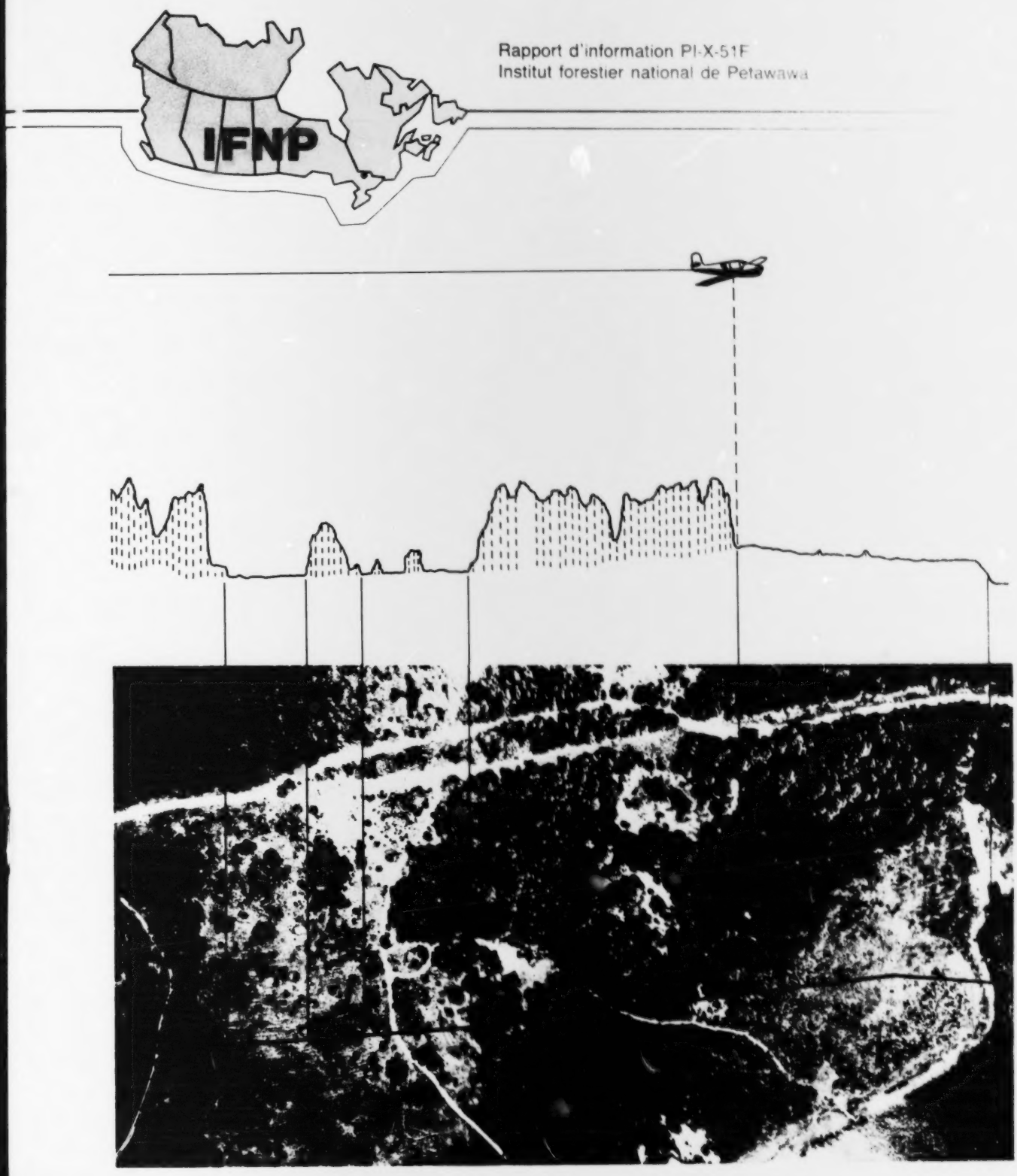
Gouvernement du Canada
Service canadien des forêts

Government of Canada
Canadian Forestry Service

Application des lasers aéroportés aux inventaires forestiers

A.H. Aldred et G.M. Bonnor

Rapport d'information PI-X-51F
Institut forestier national de Petawawa



86-05574/

INSTITUT FORESTIER NATIONAL DE PETAWAWA

Le mandat de l'Institut forestier national de Petawawa, comme celui des autres établissements du Service canadien des forêts, est de promouvoir une meilleure gestion et une utilisation plus rationnelle des ressources forestières du Canada, pour le bien économique et social de tous les Canadiens. Les objectifs des activités des programmes menés à l'institut appuient ce mandat à travers la découverte, le développement, la démonstration, l'application et le transfert des innovations. En tant qu'institut national, il doit s'attacher à des problèmes qui débordent le cadre régional ou qui nécessistent des compétences particulières de même qu'un équipement non disponible aux installations régionales du Service canadien des forêts. La plupart du temps, ses recherches sont effectuées en étroite collaboration avec le personnel des centres régionaux ou des services forestiers des provinces. Les projets de recherche et les services techniques de l'institut sont regroupés sous six principales activités:

GÉNÉTIQUE FORESTIÈRE ET BIOTECHNOLOGIE – Ce programme encadre des projets sur la génétique forestière, la microbiologie, la micropropagation, la génétique moléculaire et la recherche sur les semences. Il comprend également les services à la clientèle et la banque de semences du Centre national de semences forestières. Ce centre existe depuis longtemps et est lié à plusieurs organismes internationaux.

SYSTÈMES D'AMÉNAGEMENT FORESTIER – Ce programme intègre en recherche et développement, des projets sur les incendies de forêt, la télédétection, la météorologie, la modélisation, la croissance et la récolte, et le RIMA. Il permet ainsi l'élaboration et la démonstration de systèmes d'aménagement forestier.

STATISTIQUES NATIONALES SUR LA RESSOURCE FORESTIÈRE – Communément appelé FORSTATS, ce programme assure la coordination de l'acquisition, de la normalisation et de la publication de statistiques nationales sur les forêts du Canada. Il est aussi chargé de répondre aux demandes de renseignements de la clientèle.

SYSTÈMES DE DONNÉES FORESTIÈRES – Ce programme fournit la compétence et les systèmes informatisés nécessaires à la gestion des données acquises dans le cadre de FORSTATS et des projets de recherche à l'IFNP. Il comprend en outre un service de consultation en informatique pour les hauts fonctionnaires du SCF.

COMMUNICATIONS – Ce programme regroupe les activités de la bibliothèque et des projets touchant la sensibilisation du public, l'information, la rédaction-révision et les publications. L'institut reçoit plus de 20 000 visiteurs chaque année. Le Centre d'accueil, des visites autoguidées et un programme éducatif complet sont ouverts à tous. C'est à l'IFNP que l'on trouve l'entrepôt national de toutes les publications scientifiques du SCF.

LA FORÊT EXPÉRIMENTALE – Outre des peuplements naturels où l'on applique divers traitements dans le cadre de projets de recherche en sylviculture, la Forêt de Petawawa, mesurant 98 km^2, comprend de vastes superficies de plantations âgées de plus de 60 ans. Ces plantations expérimentales permettent d'obtenir des données sur la croissance et la récolte à la suite d'expériences de culture. Elles fournissent du matériel génétique dont le lignage est répertorié, et se révèlent de plus en plus utiles pour les études sur la micropropagation et la génétique moléculaire. La forêt permet également de mettre à l'essai des stratégies d'aménagement forestier à court et à long terme.

APPLICATION DES LASERS AÉROPORTÉS AUX INVENTAIRES FORESTIERS

Rapport d'information PI-X-51F

A.H. Aldred et G.M. Bonnor

Institut forestier national de Petawawa
Service canadien des forêts
1986

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1986
N° de catalogue Fo46-11/51-1985F
ISSN 0228-0736
ISBN 0-662-93825-9

Des exemplaires de cette publication peuvent être obtenus à l'adresse suivante:

Centre d'information technique et de distribution
Institut forestier national de Petawawa
Service canadien des forêts
Chalk River (Ontario)
K0J 1J0

Tél.: (613) 589-2880

Also available in English under the title Application of airborne lasers to forest surveys.

Table des matières

v Résumé/Abstract

1 Introduction

2 Historique

7 Matériel et méthodes

7 Principe de fonctionnement
7 Systèmes aéroportés
11 Système de traitement des échos lidar (STÉL)
11 Rétablissement de la ligne de vol
13 Télémètre à laser disponible sur le marché
13 Description des zones étudiées

15 Phase 1. Étude préliminaire des données obtenues au moyen du laser à faisceau impulsionnel

15 Objectifs
15 Méthodologie
17 Vols d'essai
17 Traitement des données
19 Analyse et résultats

26 Conclusions - Phase 1

33 Phase 2. Élaboration de méthodes d'extraction des données sur les peuplements forestiers

33 Objectifs
33 Méthodologie
34 Analyse et résultats

36 Hauteur des peuplements
42 Profils des peuplements et des terrains
42 Densité des couverts de cimes
48 Prévision du type de couvert forestier

48 Conclusions - Phase 2

51 Phase 3. Les tests formels

51 Objectifs
52 Méthodologie
54 Analyse et résultats

54 Hauteur des peuplements
55 Densité des couverts de cimes
55 Type de couvert forestier

58 Conclusions - Phase 3

59 Phase 4. Conclusions, applications et avantages

59 Résumé
60 Applications et avantages
62 Recommandations

63 Remerciements

64 Références

RÉSUMÉ

L'objet des travaux était de déterminer la nature des renseignements utiles aux inventaires des forêts qu'on pouvait obtenir grâce aux derniers perfectionnements des techniques du laser impulsionnel. Ces travaux comptaient quatre étapes: (1) l'étude préliminaire des formes d'ondes (réfléchies) du laser impulsionnel, sous l'effet des éléments remarquables du terrain et du couvert forestier; (2) l'élaboration d'hypothèses et de procédés en vue d'extraire des renseignements sur les peuplements à partir des données lasers; (3) une vérification formelle des hypothèses construites sur l'inventaire des forêts au moyen des lasers impulsionnels; et (4) l'évaluation des applications et des avantages.

Les résultats de l'étude des propriétés fondamentales des signaux réfléchis, les tests statistiques, formels ou non, les conclusions et les recommandations pour orienter les travaux à venir sont tous signalés. Le laser impulsionnel a eu des résultats particulièrement prometteurs pour ce qui est d'estimer la hauteur et la densité des arbres dans les peuplements. Quant aux possibilités de profilographie des forêts et du terrain, elles sont remarquables.

ABSTRACT

The purpose of the project was to determine what information of significance to forest surveys could be obtained from recent advances in pulsed laser technology. The project involved four phases: 1) the preliminary investigation of pulsed laser waveforms (return pulses) as influenced by the forest and other terrain features, 2) development of hypotheses and procedures for the extraction of forest stand information from laser data, 3) a formal test of hypotheses concerning the use of pulsed lasers to produce forest survey information, and 4) the assessment of applications and benefits.

The results of the investigation of basic properties of pulsed laser returns, informal and formal statistical tests, conclusions, and recommendations on the direction of further work are reported. Particularly promising results were obtained using pulsed lasers to estimate heights and densities of forest stands, and in the potential of using pulsed lasers for forest and terrain profiling.

A.H. Aldred est vice-président de Dendron Resource Surveys Ltd., Ottawa, et G.M. Bonnor est chercheur scientifique à l'Institut forestier national de Petawawa.

APPLICATION DES LASERS AÉROPORTÉS AUX INVENTAIRES FORESTIERS

INTRODUCTION

Il existe des pénuries apparentes d'arbres en pleine croissance dans la plupart des régions du Canada. Il est donc urgent que les ressources forestières soient mieux gérées et exploitées de façon plus intensive. Mais, pour ce faire, il faut obtenir de meilleurs renseignements sur la quantité de ressources disponibles et sur les éléments dynamiques du repeuplement, de la croissance et de l'épuisement des forêts. La situation oblige également à mener les opérations de coupe et de gestion dans des forêts moins accessibles où toutes les activités, y compris la collecte des données, sont plus coûteuses. Par conséquent, l'expert-forestier est constamment à la recherche de moyens plus rapides et plus économiques d'amasser des données sur les ressources qui l'intéressent. À cet égard, l'évolution des techniques de photographie aérienne et de télédétection s'est révélée utile, proportionnellement à l'inaccessibilité ou à l'éloignement de la ressource.

Les travaux dont il est question ici avaient pour objet d'étudier les avantages présentés par les progrès technologiques observés récemment dans les domaines de la détection aérienne et des inventaires forestiers. Ils découlaient directement des travaux de mise au point d'un bathymètre lidar et de recherches sur les systèmes de navigation inertielle du Centre canadien de télédétection (CCT). Les travaux qui nous occupent portaient précisément sur l'étude des propriétés d'impulsions laser réfléchies par le couvert forestier et le terrain sous-jacent. Il s'agissait de trouver une meilleure méthode de collecte et de traitement de l'information normalement obtenue au cours d'inventaires forestiers et d'étudier la possibilité de produire de nouvelles données utiles pour la gestion forestière.

Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons d'abord analysé les propriétés fondamentales d'impulsions laser réfléchies par les couverts forestiers et d'autres cibles afin de pouvoir élaborer des hypothèses et des procédés en vue d'obtenir les données laser et, ultérieurement, d'en extraire des renseignements sur les peuplements forestiers. Nous avons ensuite soumis les théories élaborées à des tests statistiques informels afin de les améliorer et de les raffiner, puis à des tests formels permettant de les vérifier de façon rigoureuse et d'évaluer les procédés. Enfin, nous avons tiré des conclusions sur la performance des détecteurs à laser au-dessus de zones boisées. Nous avons également formulé des recommandations en vue d'optimiser ces détecteurs et fourni des conseils aux gestionnaires des ressources sur leur valeur pratique dans le domaine de la foresterie. Les travaux ont été effectués en quatre étapes:

Phase I:	Étude préliminaire des formes d'ondes du laser à faisceau impulsionnel sous l'effet du couvert forestier et d'autres caractères topographiques
Phase II:	Élaboration d'hypothèses en vue d'extraire des renseignements sur les peuplements forestiers à partir des données laser
Phase III:	Vérification formelle des hypothèses mentionnées ci-dessus
Phase IV:	Évaluation des applications et des avantages.

HISTORIQUE

Ces 15 dernières années, de nombreux progrès technologiques ont été réalisés en avionique et dans la mise au point de détecteurs aéroportés. Parmi les nouveaux systèmes, les dispositifs de télémétrie à radar et à laser, utilisés souvent comme profilomètres, sont particulièrement intéressants pour les inventaires forestiers. Ils ont deux rôles généraux: (1) utilisation des données de télédétection pour aider à commander d'autres détecteurs (on utilise, par exemple, des enregistreurs de profils aéroportés (EPA) à radar afin de fournir des données auxiliaires de commande pour l'établissement de modèles photogrammétriques ou de réseaux de triangulation), et (2) extraction de renseignements utiles sur les ressources directement à partir des caractéristiques des cibles étudiées (par exemple, on détermine les caractéristiques de la glace de mer, du relief ou de peuplements forestiers à partir de profils verticaux).

Toutefois, le couvert forestier a souvent été un obstacle majeur à la profilographie exacte du relief pour l'établissement de cartes topographiques, car l'énergie émise ne pouvait le traverser pour atteindre le sol. Par ailleurs, les altimètres radar utilisés pour faciliter l'atterrissage des aéronefs étaient en fait, pour des raisons évidentes, spécialement conçus pour détecter la cime des arbres. En foresterie, les arbres constituent la cible principale et il est important d'obtenir des profils tant du couvert forestier que du terrain sous-jacent, profils qui correspondent à ce qu'on appelle parfois des échos doubles (figure 1). Ces échos fournissent directement de précieux renseignements sur la hauteur des arbres, la densité du couvert de cimes et, possiblement, les espèces en présence et, indirectement, des données sur le volume et la biomasse par corrélation avec les mesures de la hauteur, de la densité et d'autres paramètres. À l'heure actuelle, les inventaires forestiers visant à obtenir ces renseignements fondamentaux nécessitent beaucoup de main-d'oeuvre ainsi que la photo-interprétation manuelle et des travaux sur le terrain. La hauteur dominante des peuplements, qui est un paramètre tellement essentiel dans les inventaires forestiers, est souvent impossible à mesurer par radar dans les forêts tropicales, sans compter que ces appareils sont peu précis même dans les zones tempérées aux échelles moyennes qui servent habituellement à la photo-interprétation. Les erreurs de 5 à 8 m (±) sont considérées comme acceptables (Nielsen, 1971).

Au début des années 60, des enregistreurs de profils aéroportés utilisant des altimètres radar ont été mis au point pour fournir des points de référence verticaux en vue d'établir des cartes de petite et de moyenne échelles. À peu près à la même époque, on a commencé à utiliser la photographie aérienne à faible altitude pour l'étude des arbres. Pour appliquer cette méthode, il fallait trouver des moyens de mesurer la distance entre l'aéronef et le sol pendant la prise de vues afin de déterminer l'échelle du modèle photogrammétrique servant à mesurer plusieurs paramètres, comme la hauteur, le volume et la biomasse. Pour ce faire, on utilisait des paires de caméras sur une ligne de base de longueur connue, des altimètres radar et des dispositifs de repérage à laser. À peu près au même moment, la première méthode a été appliquée avec succès pour des relevés à partir d'hélicoptères en Colombie-Britannique (Lyons, 1967), et le Conseil national de recherches (CNR) a mis au point, pour le compte du Service canadien des forêts, un altimètre radar servant à basse altitude et dont les signaux traversaient la végétation;

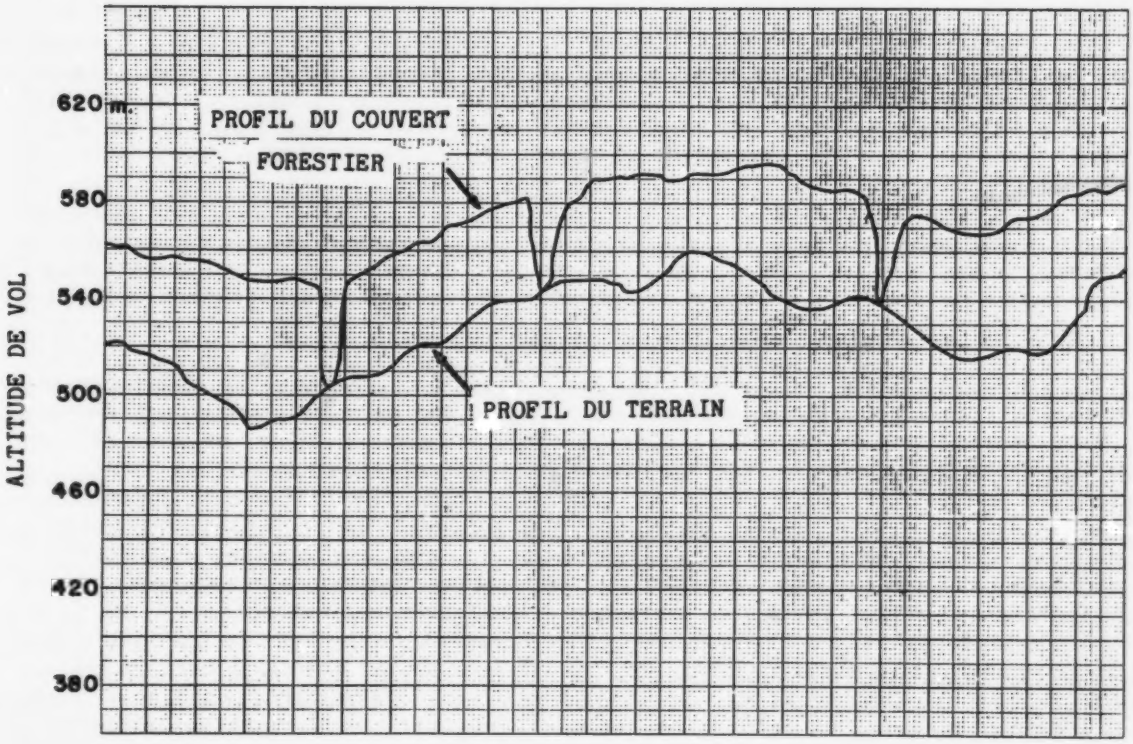


Figure 1. Représentation d'un écho double correspondant aux profils du couvert forestier et du terrain sous-jacent.

cet altimètre a été produit commercialement par la suite. À cet époque, les dispositifs à laser étaient lourds et nécessitaient une alimentation électrique considérable, mais le CNR prévoyait qu'ils finiraient par tenir le haut du pavé en foresterie à mesure que la technologie évoluerait et que les instruments deviendraient plus petits, plus légers et, peut-être, moins coûteux.

L'altimètre radar pour usage à basse altitude disponible sur le marché respectait habituellement les critères d'exactitude (± 2 % de l'altitude de vol au niveau de 95 %) sur le territoire canadien et ses signaux traversaient les peuplements forestiers du nord de la zone tempérée (Nielsen, 1974). Il a été mis à l'essai pour la première fois au-dessus d'une forêt tropicale au Guatemala: les signaux avaient de la difficulté à traverser la végétation (Sayn-Wittgenstein et Aldred, 1968b). Deux autres expériences ont été faites au Surinam et à Costa Rica pour combler cette lacune (Nielsen, 1974b; Nielsen et Aldred, 1978). Il a été difficile d'obtenir des résultats constants en partie parce que le radar utilisé faisait appel à une technologie désuète qui avait tendance à être instable. À Costa Rica, on a étudié la possibilité d'obtenir un profil double terrain-couvert forestier, mais l'exactitude du profil du manteau forestier n'a pas été établie. Les mesures altimétriques étaient sujettes à des déviations dues aux méthodes d'échantillonnage et d'intégration des données et au fait que les couverts de cimes relativement clairsemés ne constituaient pas toujours un réflecteur radar uniforme (Nielsen et Aldred, 1973).

Vers le milieu des années 60, on a étudié la possibilité d'adapter des dispositifs de télémétrie à laser pour les levés aériens (Rempel et Parker, 1964; Jensen et Ruddock, 1965; Jensen, 1967). Pour ce faire, on a eu recours à de puissants faisceaux laser orientés sur des surfaces naturelles plutôt que sur des miroirs ou des réflecteurs utilisés normalement pour la télémétrie à partir du sol. On a également monté l'appareil laser à la verticale et utilisé des enregistreurs graphiques pour traiter les grandes quantités de données produites pendant le vol. Schweider (1969) a également décrit l'application d'un système de ce genre à des travaux d'altimétrie. De plus, l'Armée américaine a effectué une étude poussée des propriétés de ce laser Spectra-Physics à He-Ne en mesurant les déphasages en faisceau continu (Link, 1973), afin d'étudier la possibilité de se servir d'un profilomètre à laser pour évaluer rapidement l'inclinaison et la rugosité du terrain et la présence d'obstacles sur certains lieux d'atterrissage non préparés. Plusieurs auteurs, notamment Hibler (1975), Tooma et Tucker (1973), et Kirby et Sutton (1981), ont traité de l'utilisation de profilomètres à faisceau laser continu pour établir le profil de la glace de mer. La figure 2 montre un profil établi par ce type de laser.

D'autres auteurs (Rempel et Parker, 1964; Link, 1969) ont décrit d'autres applications du profilomètre à faisceau laser continu, notamment pour l'étude du microrelief, des caractéristiques hydrographiques, des terrains découverts, des étendues d'herbages, des cultures de maïs, des champs labourés, des arbres, etc. En 1973, le Service canadien des forêts a fait l'essai d'un laser à He-Ne similaire pour l'étude du potentiel forestier (Forest Mgmt. Inst., 1978). Les mesures des distances ont été vérifiées au sol et dans les airs. L'exactitude des mesures (écart inférieur à ±30 cm et 300 m) était supérieure à celle exigée pour les inventaires forestiers, mais le faisceau n'atteignait le sol qu'en présence de couverts de cimes ayant une certaine

densité. Ainsi, des distances de plusieurs centaines de mètres pouvaient être franchies sans que le faisceau puisse atteindre le sol. En terrain montagneux, les mesures du niveau du sol et, donc, de la hauteur du couvert forestier étaient approximatives. Arp et al. (1982) ont décrit certaines applications du profilomètre à faisceau laser continu au-dessus de la forêt tropicale. Ces expériences visaient surtout la collecte de données altimétriques, le couvert forestier constituant surtout un obstacle à franchir; en effet, il a été très difficile d'obtenir un nombre suffisant d'échos laser provenant du sol. En outre, les peuplements tropicaux pluriétagés, qui ont une forte densité, forment un bouclier encore plus impénétrable que les forêts de la zone tempérée.

Au milieu et à la fin des années 70, les lasers à faisceau impulsionnel ont été appliqués aux levés aériens. Cette technologie était intéressante parce qu'elle constituait une méthode simple de télémétrie: il suffisait de mesurer le temps d'aller et retour d'une impulsion se réfléchissant sur une cible. Étant donné qu'on connaît la vitesse de la lumière, le temps de parcours peut être converti en une distance. Lorsque les impulsions sont courtes, on peut mesurer les distances à quelques centimètres près par des méthodes de traitement des signaux. La figure 3 illustre le produit d'un profilomètre à laser impulsionnel. Cette application a été décrite en détail par Mamon et al. (1976, 1978). Les lasers à faisceau impulsionnel ont été appliqués avec succès pour la reconnaissance des glaces (Fabian et al., 1979; Lowry et Brochu, 1975); en hydrographie, surtout pour mesurer la profondeur de plans d'eau (O'Neil, 1980; Hodg et al., 1980; Enabnit, 1979); ainsi que pour l'établissement de cartes topographiques et l'étude du microrelief et de la traficabilité de terrains (Collins, 1979; Krabill et al., 1981; Link et Collins, 1981). Ces derniers auteurs, tout comme Nelson et al. (1983), ont appliqué cette technique à l'étude des cultures et des problèmes posés par le couvert forestier. Krabill et al. (1984) ont fait l'essai d'un lidar océanographique, mis au point originalement pour des études bathymétriques, pour établir le profil de terrains. Leurs travaux présentent un intérêt particulier en ce qu'ils ont tenté de surmonter l'obstacle du couvert forestier. Il apparaît qu'en hiver (en l'absence de feuilles), les profils établis étaient assez fiables car environ 40 % des impulsions atteignaient le sol. Toutefois, en été (en présence de feuilles), la technique était beaucoup moins efficace. Pendant cette saison, les impulsions pénétraient plus facilement les peuplements de conifères que les peuplements de décidus, mais les auteurs n'ont pu tirer de conclusions définitives étant donné que les conifères étaient peu abondants dans la région à l'étude. En outre, il a été établi que la végétation sous-jacente avait une forte influence sur la pénétration des impulsions. Krabill et al. (1984) estiment qu'il faudrait faire l'essai d'un faisceau laser à très haute fréquence d'impulsions et à basse altitude car, selon eux, cela pourrait donner de meilleurs résultats.

L'application la plus récente des lasers à faisceau impulsionnel concerne l'utilisation de balayeurs aéroportés ou spatiaux qui collectent constamment de grandes quantités de données télémétriques sur des lignes de balayage transversales à la ligne de vol (Krobick et Elacki, 1981) ou sur une trajectoire elliptique. Krabill et al. (1984) traitent également de l'utilisation de balayeurs coniques qui assurent la détection le long de couloirs plutôt que de transects. Le Centre canadien de télédétection travaille à la mise au point d'un bathymètre laser à balayage qui devrait être mis à l'essai à l'automne de 1984. Dans l'avenir, ces nouveaux systèmes

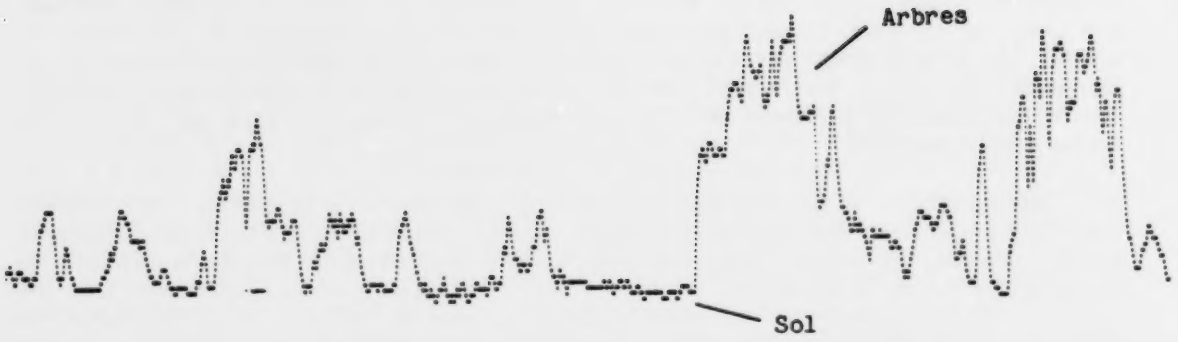


Figure 2. Diagramme linéaire produit à l'aide d'un profilomètre laser à faisceau continu. On peut remarquer le profil d'une forêt mixte (décidus/résineux) et du terrain sous-jacent.

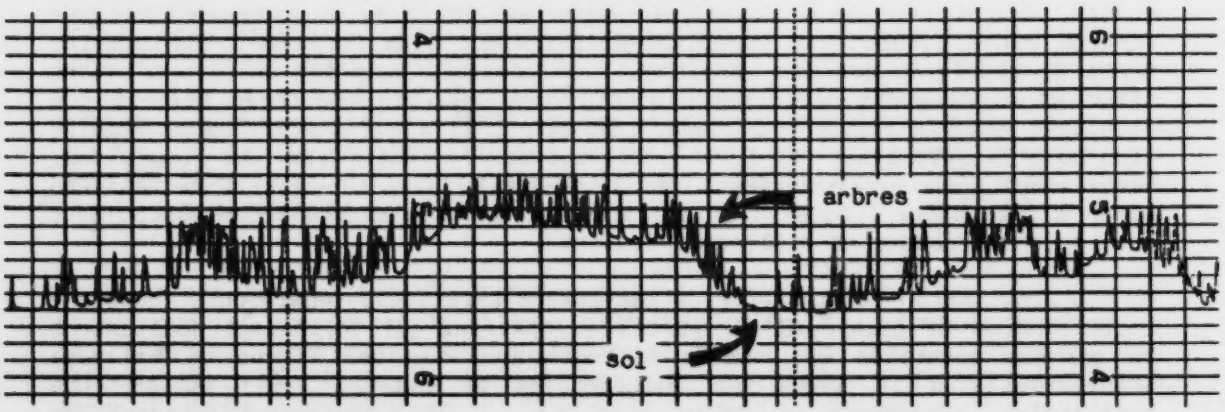


Figure 3. Diagramme produit par un profilomètre laser à faisceau impulsionnel montrant un peuplement de résineux et le terrain sous-jacent.

pourraient jouer un rôle important dans les inventaires forestiers. Toutefois, les travaux dont il est question ici ne concernent que les propriétés fondamentales des impulsions laser réfléchies par les peuplements forestiers. Nous espérons néanmoins que nos recherches ouvriront la porte à l'application en foresterie des techniques de pointe.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Nous énoncerons brièvement les principes de fonctionnement des systèmes à laser puis nous décrirons deux systèmes utilisés pendant les travaux, y compris les dispositifs de traitement des données et les systèmes aéroportés. Enfin, nous décrirons les zones touchées par les essais aériens.

Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un laser à faisceau impulsionnel utilisé pour la télémétrie (mesure des distances) est simple. Un faisceau laser relativement étroit est émis par impulsions de courte durée (p. ex. 5 à 10 ns) vers la cible qui le renvoie vers un récepteur. Puisque l'on connaît la vitesse de la lumière, il suffit de mesurer le temps d'aller et retour des impulsions puis de les convertir en une distance. Comme la vitesse de la lumière est d'environ 300 x 10^3 km/s, la durée des impulsions doit être de l'ordre des nanosecondes: 1 ns équivaut à peu près à 30 cm. La figure 4 illustre ce principe. Plus on peut isoler un point distinct sur l'impulsion émise et reçue, le sommet de l'onde par exemple, plus la distance peut être mesurée avec précision.

Les deux lasers mis à l'essai pendant nos travaux pouvaient servir à mesurer les distances. Toutefois, le laser bathymétrique du CCT était conçu de manière que la forme de l'impulsion réfléchie (l'écho) puisse être déterminée. Autrement dit, le temps d'aller et retour de l'impulsion et les variations d'amplitude de l'écho tout entier sont codés (figure 5). Originalement, l'appareil a été utilisé pour la détection d'échos provenant de la surface et du fond d'un plan d'eau. Ainsi, les différences dans le temps d'aller et retour des impulsions pouvaient servir à déterminer la profondeur de l'eau. Les différents échos provenant de cibles situées à différentes distances de l'appareil portaient à croire que d'autres cibles, telles que le couvert forestier et le terrain sous-jacent, observées du haut des airs, pourraient fournir des renseignements utiles sur la hauteur des peuplements forestiers. C'est dans ce contexte que notre projet a pris naissance.

Systèmes aéroportés

Au cours de nos travaux, nous avons fait l'essai d'un bathymètre à laser expérimental utilisé par le CCT et d'un laser de télémétrie disponible sur le marché, de dimensions moindres, servant principalement à déterminer l'altitude d'un aéronef au-dessus du sol. Le premier appareil a été choisi surtout parce qu'il pouvait capter l'écho au moyen d'un numériseur multifonction et d'un magnétophone de grande puissance. Le second système a été choisi parce qu'il était disponible et à cause de sa rapidité de fonctionnement, caractéristique qui, selon Krabill (1984), méritait d'être étudiée plus à fond.

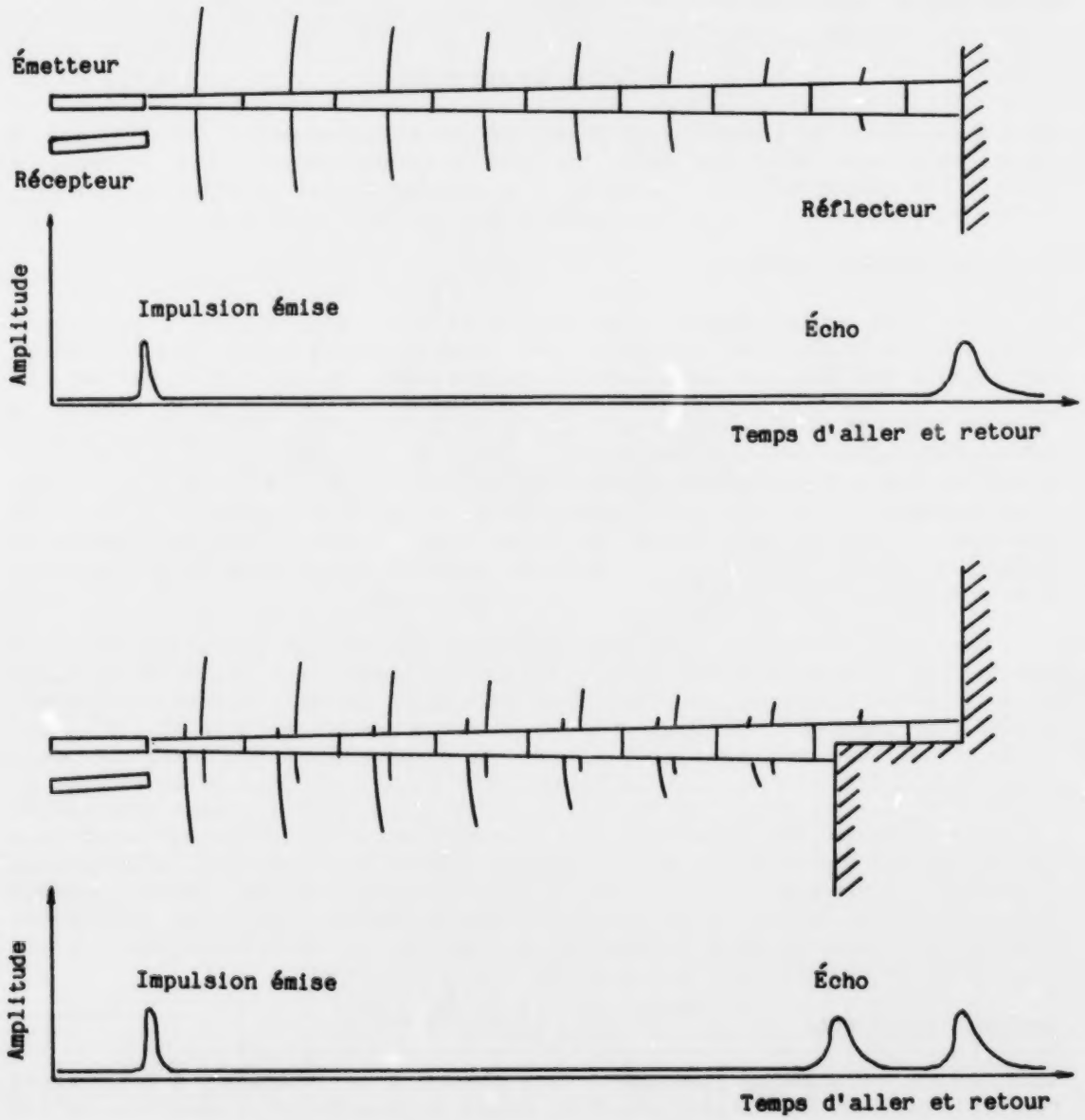


Figure 4. Diagramme montrant le temps d'aller et retour d'une impulsion laser réfléchie sur une surface unie (dessin du haut) et sur une cible caractérisée par deux plans (dessin du bas).

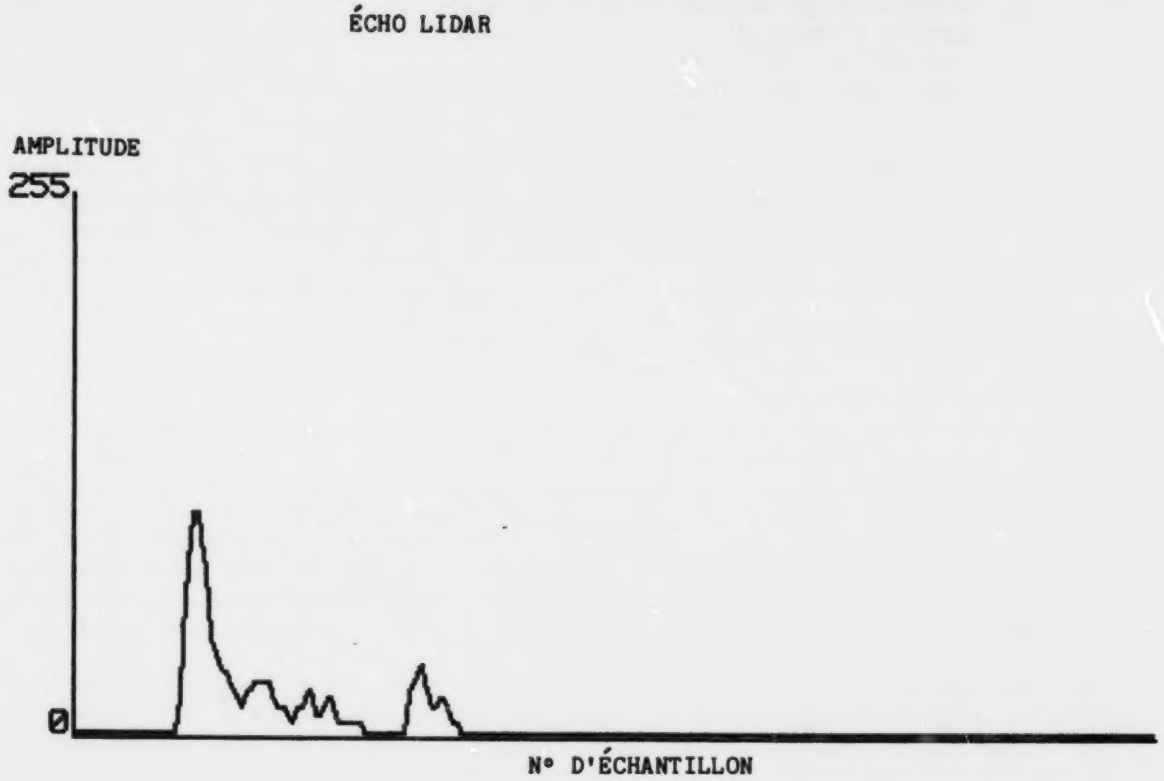


Figure 5. Exemple d'un écho provenant d'un couvert forestier capté par un bathymètre lidar du Centre canadien de télédétection. L'amplitude de l'écho est représentée sur l'ordonnée et le temps d'aller et retour, sur l'abscisse. Le premier sommet de l'écho (à l'extrême gauche) correspond à la cible la plus proche (dans le cas présent, le couvert forestier) et le dernier, à la cible la plus éloignée, soit la couverture morte ou le sol.

Le système aéroporté du CCT se composait des éléments suivants:

Bathymètre lidar MKII
Caméra cartographique Wild RC10
Caméra vidéo
Système de navigation inertielle
Numériseur multifonction Tektronix R7912
Système d'acquisition de données

O'Neil (1980) a décrit en détail le bathymètre lidar MKII. Les principales caractéristiques de fonctionnement de l'appareil peuvent s'appliquer à des travaux de foresterie:

Longueur d'ondes	:	1064 nm (infrarouge) 532 nm (vert)
Fréquence des impulsions:	:	10 Hz
Largeur (durée) des impulsions:		5 ns à 532 nm
Portée maximale	:	2000 m
Divergence du faisceau	:	1,2,5,10,25 mR (réglable)

Nous avons recueilli des données de deux types: des mesures de distance (distance oblique) dans l'infrarouge et des mesures de tous les échos captés dans le vert à l'aide d'un numériseur multifonction. Le système aéroporté d'acquisition de données accepte les signaux captés sur les deux longueurs d'onde, effectue le chromocodage des données et les enregistre sur une bande utilisable sur ordinateur.

Les caméras cinématographique et vidéo servaient à maintenir l'aéronef sur la trajectoire de vol et la position des émissions laser sur celle-ci. Cette opération est décrite en détail plus bas. Les données de navigation n'ont pas été utilisées car la portée des travaux a dû être limitée en raison de compressions budgétaires.

Le système aéroporté qui complétait le laser disponible sur le marché comprenait les éléments suivants:

Caméra de reconnaissance Vinten (70 mm)
Détecteur d'angles de tangage et de roulis
Capteur de pression barométrique
Enregistreur à bande
Magnétophone numérique
Ensemble contrôleur-système d'acquisition de données commandé par microprocesseur

Les caractéristiques de fonctionnement du laser télémétrique étaient les suivantes:

Longueur d'onde	:	proche infrarouge (nd-YAG)
Fréquence de mesure	:	5,20,80,320 Hz (réglable)
Portée maximale	:	500 m
Divergence du faisceau:		2 mR
Précision	:	±40 cm

Les images prises par la caméra de 70 mm servaient à maintenir l'aéronef sur sa trajectoire, tout comme la caméra vidéo dont il a été question précédemment. Le détecteur d'angles de tangage et de roulis servait à corriger la distance oblique du faisceau laser en fonction de la distance verticale et à produire des modèles photogrammétriques. Le capteur barométrique était utilisé de concert avec ces deux instruments pour établir le profil du terrain.

Système de traitement des échos lidar (STÉL)

Le système de traitement des échos lidar du CCT consiste essentiellement en un ordinateur PDP 11/23 pourvu d'une unité centrale de traitement LSI 11/23 et d'une mémoire dont la puissance peut atteindre 256 kilo-octets (avec gestion mémoire). Les unités périphériques reliées au système sont les suivantes: un dérouleur de bande magnétique de 1600 bits-pouce, un disque dur de 60 méga-octets (divisé en trois volumes), un terminal graphique Tektronix 4025 et un traceur-imprimante Versatec.

Le STÉL est conçu pour la lecture et le traitement des échos provenant du fond marin captés par le bathymètre lidar. Les données lidar sont enregistrées sur une bande pilote sous une forme similaire à toutes les données non-imagerie recueillies par le CCT. Un logiciel est utilisé pour la lecture et la remise en forme des données de la bande pilote sur des fichiers de disques qui permettent l'accès sélectif en langage Fortran. Les fichiers de disques sont doublés sur bandes pilotes pour éviter le long travail de suppression des données brutes lorsqu'un traitement plus poussé est nécessaire.

Le STÉL contient un progiciel complet appelé BEST, dont la première fonction est de permettre aux profanes de l'informatique de traiter et de manipuler les données lidar à l'aide d'un système de menus.

Le progiciel BEST permet de présenter les graphiques de données sur un terminal Tektronix ou sur support papier par l'intermédiaire du Versatec. La figure 5 est la représentation sur support papier d'un écho et la figure 6 montre plusieurs échos. On a fait grand usage des graphiques pour repérer les données correspondant à des accidents géographiques remarquables, qui ont ensuite servi à établir des sous-ensembles d'échantillons. Vu que le logiciel permettait de pointer chaque écho laser, il a été utilisé pour déterminer les effets sur la forme et l'amplitude des impulsions de paramètres comme la divergence du faisceau et la hauteur et la densité des peuplements étudiés.

Un logiciel d'analyse des peuplements forestiers a été intégré dans le progiciel BEST afin de simplifier le travail de l'opérateur et d'assurer l'utilisation optimale de menus et de sous-programmes courants. Il produisait principalement des valeurs numériques concernant la hauteur et la densité des peuplements et les essences forestières avec les statistiques correspondantes. Les sorties graphiques se limitaient à des tableaux de données et à des profils des peuplements et des terrains qui servaient à évaluer la possibilité d'établir des profils à l'aide de systèmes à laser.

Rétablissement de la ligne de vol

Le système d'enregistrement des échos comprenait une caméra vidéo, un magnétoscope et une caméra cartographique grand format. Le rétablissement de la

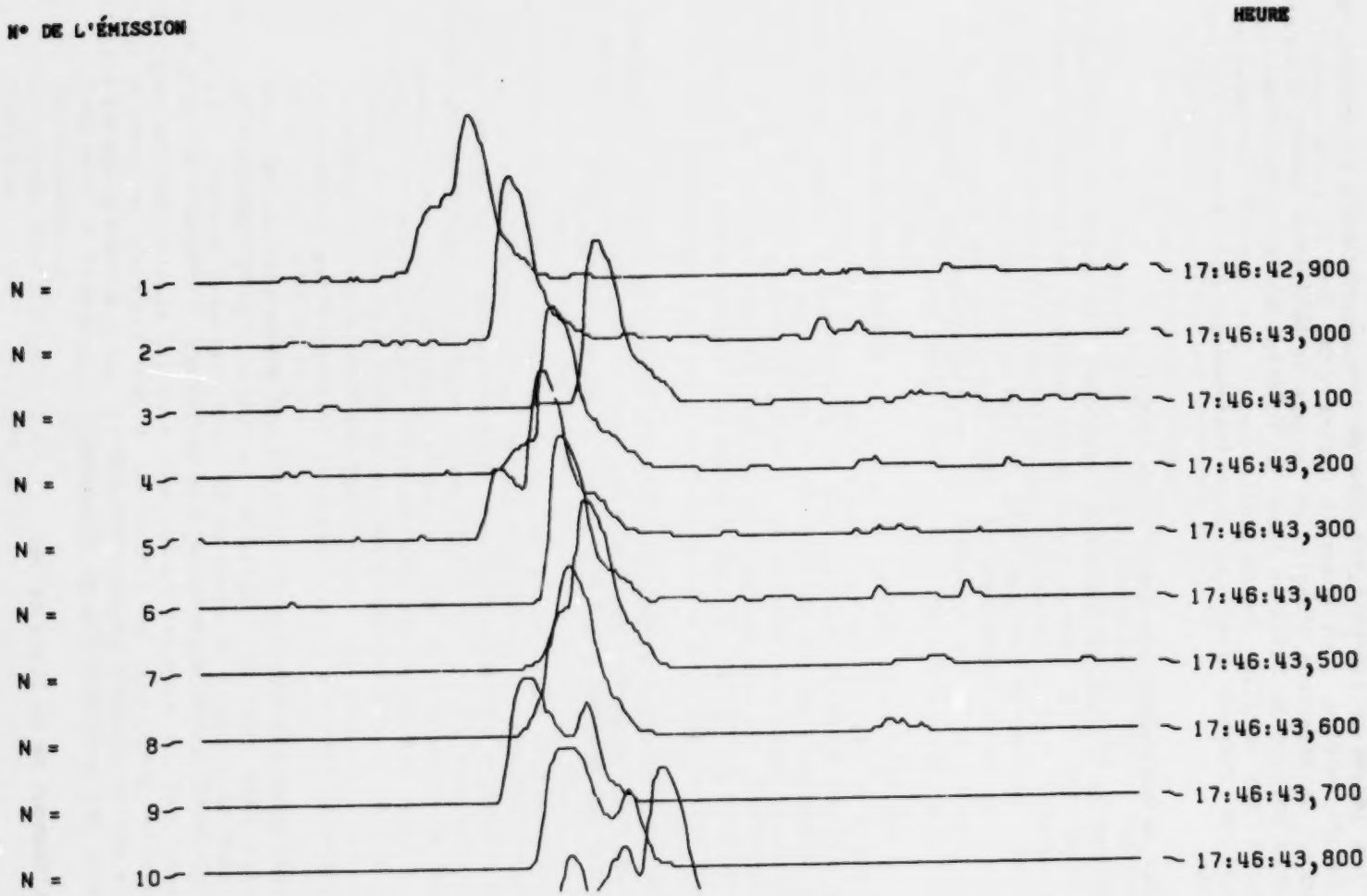


Figure 6. Exemple d'une série de dix échos laser captés à intervalles de 1/10 de seconde.

ligne de vol était assuré par un magnétoscope dont la vitesse de reproduction était variable et qui pouvait figer l'image.

Un vol de nuit a été effectué pour aligner le faisceau laser sur la bande vidéo en émettant des impulsions pendant que la bande se déroulait. La lumière ambiante était tellement faible que la trajectoire du faisceau laser par rapport à la caméra vidéo correspondait à un éclair lumineux. Pour maintenir la ligne de vol, on pointait sur l'écran vidéo les éclairs, qui correspondaient à l'empreinte du faisceau.

Nous avons donné un en-tête général aux images vidéo, avec l'heure des prises de vue au dixième de seconde près. L'heure des émissions laser a également été enregistrée pour chaque donnée stockée sur la bande pilote. Ainsi, l'heure d'une prise de vue correspondant à un accident géographique pouvait être corrélée avec une émision laser. Toutefois, des problèmes de synchronisation temporelle entre les images vidéo et les émissions laser sont survenus pendant l'utilisation du système aéroporté, de sorte qu'il a fallu interpréter certains graphiques d'impulsions pour faire correspondre exactement les émissions laser avec les images vidéo.

Télémètre à laser disponible sur le marché

Les données suivantes ont été enregistrées sur bande pendant l'utilisation du système disponible sur le marché: notes sur les prises de vue (numéros de rouleau et d'image), angles de tangage et de roulis, pression atmosphérique et distance entre l'aéronef et la cible (habituellement, le couvert forestier ou d'autres accidents de terrain) établie par laser. Un contrôleur commandé par microprocesseur déclenchait les caméras à intervalles préétablis et, à d'autres intervalles préétablis qui pouvaient coïncider avec les premiers, ils échantillonnaient les données captées par tous les autres détecteurs. Les données étaient introduites dans un tampon et transmises au magnétophone à mesure que la caméra et les compteurs d'échantillonnage avançaient respectivement à l'image et au numéro suivants.

Les données contenues dans le dérouleur de cassette de bande magnétique étaient lues par un microprocesseur HP puis remises en forme et stockées dans des fichiers HP pour analyse ultérieure. Celle-ci était effectuée à l'aide du micro-ordinateur auquel étaient branchées plusieurs unités périphériques, comme un numériseur graphique, un traceur de graphiques et une imprimante. Un traceur photogrammétrique numérique a également été utilisé avec le microprocesseur pour la collecte des données sur les essais et d'autres renseignements supplémentaires.

Description des zones étudiées

Les données produites par le bathymètre à laser sur les peuplements forestiers, les éléments connexes et le terrain ont été nécessaires à toutes les étapes des travaux pour étudier les propriétés de l'énergie de base réfléchie par ces cibles, pour élaborer des hypothèses sur les méthodes permettant d'obtenir des renseignements utiles et, enfin, pour faire l'essai et l'évaluation formels de ces méthodes. Le système du CCT a été mis à l'essai à trois endroits, non loin d'Ottawa, et le laser disponible sur le marché, de dimensions moindres et appartenant à Dendron, a été mis à l'essai dans l'ouest de l'Ontario. Le choix des emplacements a été fait en fonction des objectifs

des principales phases des travaux et pour obtenir une représentation assez globale de quatre types de couvert forestier et de reliefs plat et incliné et pour comparer les conditions hivernales avec les conditions estivales (surtout pour étudier les effets de la présence ou de l'absence de feuilles dans les arbres).

Les essais ont eu lieu aux quatre endroits suivants:

1. Avenue Woodroffe: Cet emplacement, situé à proximité d'Ottawa, est caractérisé par des peuplements purs et mixtes de décidus et de résineux et par un relief plat. Dans la plupart des cas, les peuplements forestiers étaient entourés de champs et d'autres zones dégagées. La zone d'essai comprenait des rues, des bâtiments de différentes dimensions, des arbres dispersés et d'autres cibles présentant un intérêt pour l'étude.
2. Casselman: Cette zone, située à environ 50 km à l'est d'Ottawa, comprenait des peuplements mixtes de hauteur et de densité plus variables que ceux de la zone 1. À part certains secteurs escarpés le long des cours d'eau, le relief était essentiellement plat.
3. Lac Clayton: Cette zone, située à environ 65 km au sud-ouest d'Ottawa, a été choisie parce qu'elle comprenait différentes combinaisons de peuplements de décidus et de résineux et de peuplements mixtes sur un terrain très accidenté. Certaines pentes avaient une inclinaison d'environ 25 %. La hauteur et la densité des peuplements étaient très variées et il s'y trouvait d'autres cibles naturelles, comme des prés, des affleurements rocheux et des marécages. Comme la région n'était pas très peuplée, le bathymètre à laser du CCT a pu être mis à l'essai à un réglage de forte intensité (avec un faisceau plus étroit).
4. Red Rock, Ontario: L'essai du système disponible sur le marché a eu lieu au cours de travaux d'exploitation touchant tout un ensemble de conditions forestières dans des secteurs au relief accidenté. Les essais ont également eu lieu au-dessus d'un vaste parc de stationnement qui a servi à étalonner le système et à déterminer sa précision pour des travaux de télémétrie au-dessus de terrains dégagés.

Originalement, il avait été prévu d'effectuer deux essais du système du CCT pendant l'automne de 1982, soit avant et après la chute des feuilles, avant les neiges. Toutefois, le système lidar n'a pu être utilisé avant la tombée des feuilles, si bien que le premier essai a dû être reporté à l'été de 1983. Les deux vols ont eu lieu au-dessus des mêmes zones mais, dans la plupart des cas, les transects n'étaient pas identiques pour les deux essais.

Phase 1

ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DES DONNÉES OBTENUES AU MOYEN DU LASER À FAISCEAU IMPULSIONNEL

Il faut se poser deux questions fondamentales concernant l'utilisation d'enregistreurs de profils aéroportés pour l'étude de peuplements forestiers. D'abord, avec quelle précision peut-on mesurer les distances à partir d'un aéronef en vol? Ensuite, jusqu'à quel point le faisceau laser peut-il traverser le couvert forestier pour atteindre le sol sous-jacent? Les réponses à ces questions contribueront grandement à déterminer la valeur pratique du laser à faisceau impulsionnel pour la collecte de renseignements utiles sur la hauteur et la densité des peuplements, paramètres fondamentaux des inventaires forestiers. L'exemple montré dans la figure 7, qui correspond à une situation idéale, indique comment on peut estimer la hauteur moyenne des peuplements lorsque le faisceau traverse le couvert forestier. Par conséquent, les deux questions ci-dessus ont tenu une grande place dans l'évaluation préliminaire des possibilités du laser à faisceau impulsionnel et dans le choix des sujets d'étude les plus intéressants.

La phase 1 des travaux avait pour objet de faire le point sur les travaux antérieurs pertinents afin de déterminer les pistes les plus prometteuses et de faire l'essai des nouvelles techniques disponibles au-dessus de régions boisées en vue d'évaluer le potentiel des lasers à faisceau impulsionnel. Les résultats obtenus ont permis d'élaborer des approches, des méthodes et des hypothèses pour les phases ultérieures des travaux.

Objectifs

La phase 1 visait les objectifs suivants:

1. Déterminer avec quelle précision un système laser installé dans un aéronef en mouvement peut mesurer les distances par rapport à une cible terrestre.
2. Déterminer s'il est possible de calculer directement la hauteur de peuplements forestiers à partir des mesures de distance.
3. Déterminer la possibilité de calculer la hauteur de peuplements forestiers à partir d'échos laser individuels.
4. Déterminer s'il est possible de calculer la hauteur de peuplements forestiers à l'aide d'un laser à impulsions rapides utilisé à basse altitude (dont le faisceau traverse les trouées dans les cimes).
5. Déterminer jusqu'à quel point la présence ou l'absence de feuillage influe sur les mesures de la hauteur des peuplements.
6. Déterminer l'effet de différents réglages des lasers, par exemple la divergence du faisceau, sur les mesures de la hauteur des peuplements.

Méthodologie

Après l'examen des résultats des études antérieures, les lasers utilisés pendant nos travaux ont été mis à l'essai au-dessus de surfaces planes et dégagées, comme des champs et des aires de stationnement de centres commerciaux. Les vols effectués au-dessus de couverts forestiers aux emplacements

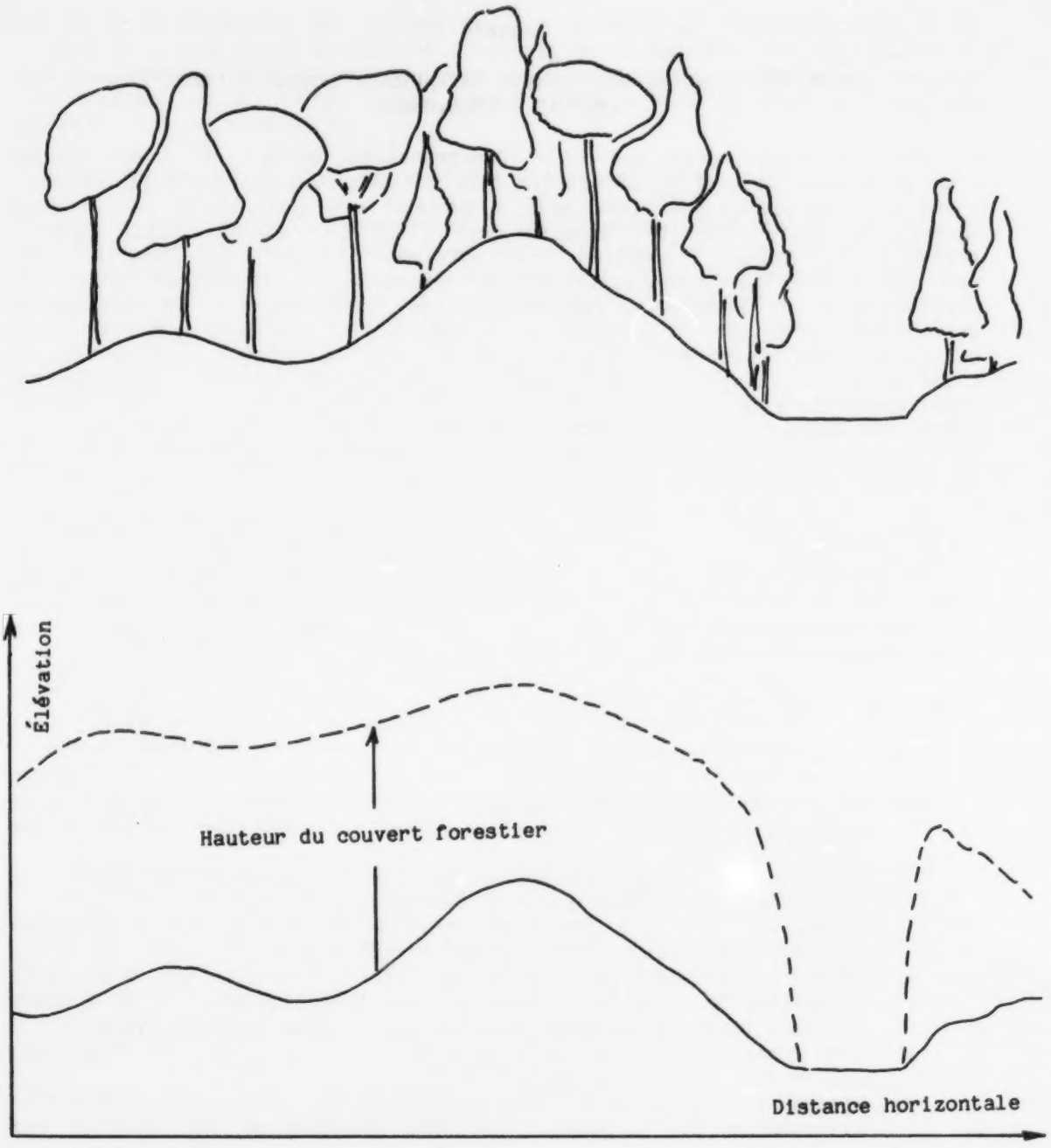


Figure 7. Dessin du haut: profil d'un peuplement forestier. Dessin du bas: profil double idéal du peuplement et du terrain sous-jacent montrant de quelle façon on mesure la hauteur du couvert.

1 et 4 portent à croire qu'il serait possible de calculer directement la hauteur des peuplements à partir des données télémétriques.

L'analyse des renseignements fournis par la forme d'échos laser précis n'était fondée que sur les vols d'essai du laser du CCT effectués au-dessus des emplacements 1, 2 et 3 décrits précédemment. Ces vols ont également permis d'étudier les effets de différents réglages de la divergence du faisceau. Vu que les premiers vols d'essai du laser du CCT n'ont eu lieu qu'après la chute des feuilles, nous n'avons évidemment pas pu étudier les peuplements en présence de feuilles. Par ailleurs, nous avons également fait l'essai du laser télémétrique au-dessus de l'emplacement 4 en l'absence de feuilles et, plus tôt, au-dessus de peuplements de décidus ayant encore leurs feuilles. Bien que ce dernier essai n'ait pas été prévu dans le cadre de nos travaux, il a permis d'étudier l'efficacité des systèmes en présence de feuilles.

Vols d'essai

Les essais du système du CCT au-dessus des emplacements 1 à 3, décrits précédemment, ont pris fin le 13 décembre 1982. L'essai du laser disponible sur le marché a eu lieu au-dessus de l'emplacement 4 du 28 au 30 octobre 1982. Les données fournies par les détecteurs de navigation au cours des vols d'essai du système du CCT ont été enregistrées par le système aéroporté d'acquisition de données et les données laser et de chromocodage, par le système d'acquisition des données bathymétriques. Les informations produites par le laser opérationnel ont été stockées sur film, par un magnétoscope à cassettes et par un enregistreur à bande. L'alignement des images captées par les caméras cinématographique et vidéo avec le faisceau du laser du CCT (pointage par visée) a eu lieu pendant un second vol, de nuit, juste après le vol principal. Le pointage par visée du faisceau du système disponible sur le marché a été réalisé par un viseur infrarouge et par un alignement en laboratoire.

Traitement des données

Les prises de vues effectuées pendant les vols d'essai du système du CCT ont été traitées, annotées et imprimées après les vols. Les données enregistrées par le système d'acquisition des données bathymétriques ont été transférées dans le système de traitement de données du laser du CCT, remises en forme et stockées temporairement sur disque. Le logiciel disponible a servi à extraire les données télémétriques et celles concernant les échos individuels. La plupart des données ont été examinées à l'aide d'un moniteur vidéo et les plus pertinentes ont été pointées pour analyse ultérieure. Dans le cas d'essais au-dessus de peuplements particuliers, des séries d'échos ont été pointées (figure 6).

Les données produites par le laser disponible sur le marché consistaient principalement en des mesures de la distance entre l'aéronef et la cible enregistrées sur bande continue. Les numéros de prises de vues ont également été inscrits sur le bord de la bande (figure 8). Une fois le relevé photographique terminé, les films ont été traités et annotés et la ligne de vol a été rétablie. La corrélation entre les prises de vues et les courbes enregistrées sur la bande a été indiquée à la main sur celle-ci.

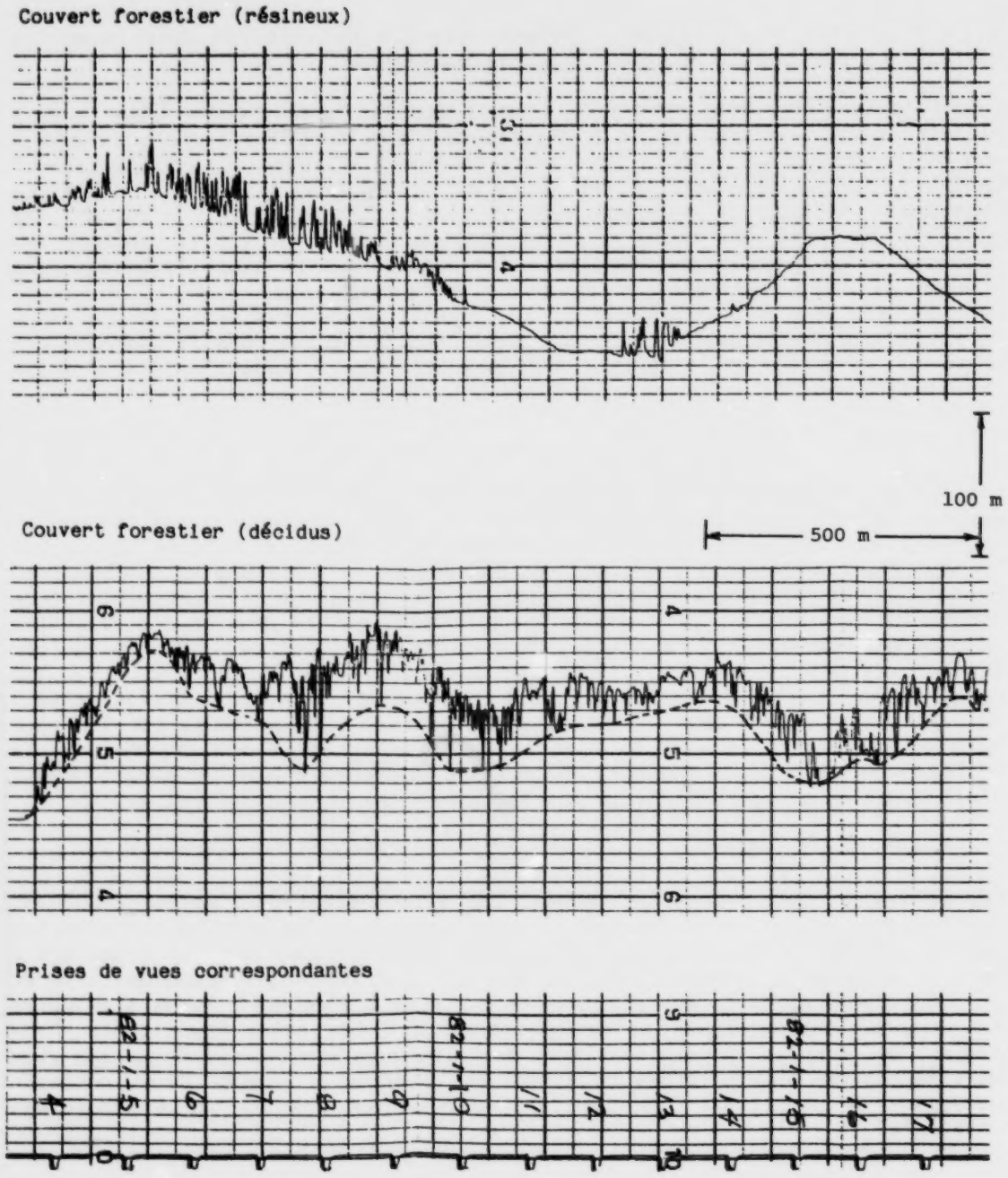


Figure 8. Profils de couverts forestiers établis à l'aide du laser disponible sur le marché. La photographie correspondante apparaît à la page 20. La courbe discontinue correspond au profil probable du terrain sous-jacent.

Pour que les analyses puissent être réalisées, les données laser ont dû être corrélées avec les accidents de terrain relevés sur les photographies aériennes et, par la suite, avec les accidents eux-mêmes sur le terrain. Originalement, le CCT avait envisagé d'utiliser les données de navigation recueillies pendant les vols et des méthodes similaires à celle décrite par Gibson et al. (1981) pour compléter le rétablissement des lignes de vol. Toutefois, à cause de compressions budgétaires, on a dû employer une méthode permettant d'éviter le coût du temps de programmation et du temps machine nécessaires au traitement des données produites par le système de navigation inertielle. La méthode utilisée, qui faisait appel aux caméras vidéo et photographique, était la suivante: un curseur a été installé sur le moniteur vidéo pour indiquer l'<<empreinte>> laser repérée grâce au pointage par visée, pour permettre de voir cette empreinte sur l'écran pendant les vols diurnes; ensuite, la bande vidéo produite pendant les vols d'essai a été reproduite et les images ont été corrélées avec les photographies aériennes à partir des détails visibles sur les deux supports. L'empreinte laser indiquée par le curseur a donc pu être pointée sur les photographies aériennes. Comme les impulsions laser sont chromocodées et comme l'heure est indiquée sur le moniteur vidéo, chaque impulsion a également pu être marquée sur les photographies. Le système vidéo s'est révélé très utile à cet égard car il pouvait faire la lecture au ralenti et figer les images. La représentation des lignes de vol et des numéros de prises de vues sur les photographies a donc permis de compléter le rétablissement des lignes de vol nécessaire à la corrélation des émissions laser avec les accidents de terrain. La figure 9 montre une empreinte laser type le long d'un transect.

Une méthode similaire a été employée pour le rétablissement de la hauteur de vol, sauf qu'une caméra de poursuite a été utilisée au lieu d'un système vidéo. L'heure des prises de vues effectuées par la caméra de poursuite a été enregistrée et corrélée avec d'autres données, comme les angles de tangage et de roulis et l'altitude.

Dans les deux cas, nous n'avons analysé les données laser qu'après avoir établi leur correspondance exacte avec les caractéristiques du terrain.

Analyse et résultats

Plusieurs essais de lasers à faisceau continu révèlent que ceux-ci peuvent mesurer les distances avec une marge d'erreur de ±30 cm tout au plus (Forest Mgmt. Inst., 1978), soit avec un degré de précision répondant largement aux besoins en matière de foresterie. Théoriquement, les lasers à faisceau impulsionnel, plus récents, peuvent mesurer les distances encore plus précisément (Krabill et al., 1984). Nous avons vérifié la précision des deux systèmes à laser utilisés pendant nos travaux.

Pour déterminer avec quelle précision les lasers pouvaient mesurer les distances, nous avons choisi des objectifs visibles sur les photographies aériennes puis mesuré la distance horizontale entre ces objets sur le terrain. À partir de ces mesures et de la longueur focale étalonnée de l'objectif photographique, nous avons déterminé la distance entre l'aéronef et les cibles en question, distance que nous avons comparée avec celle indiquée par les lasers. Les écarts étaient tellement faibles (inférieurs à 1 m) que les erreurs pourraient être attribuées autant aux méthodes de photographie aérienne qu'aux télémètres à laser. Vu que des erreurs de cette amplitude

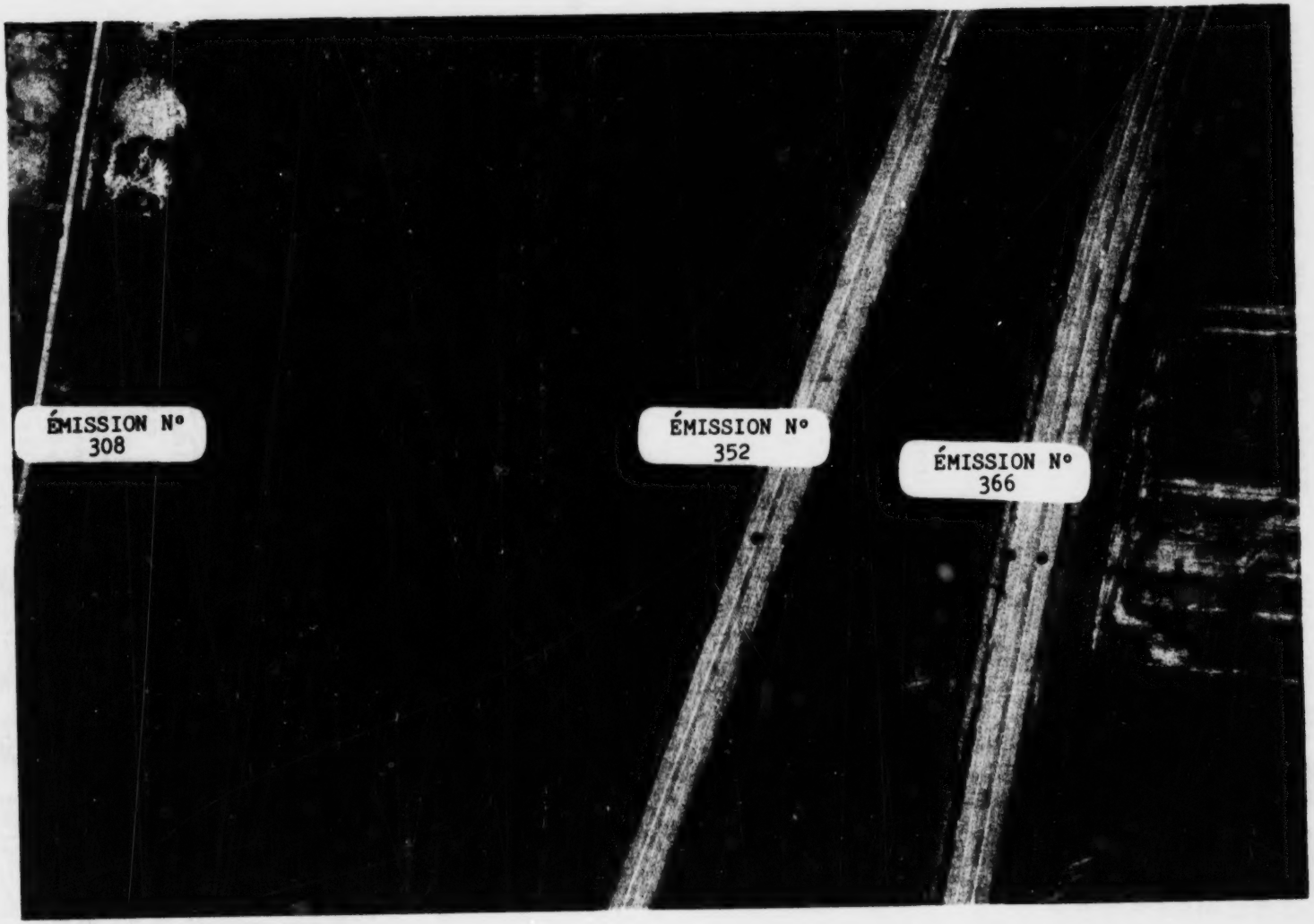


Figure 9. Partie d'une photographie aérienne montrant une empreinte laser (à intervalles de deux échantillons). Chaque point correspond à une zone touchée par une émission laser à 10 mR.

étaient considérées comme négligeables pour les inventaires forestiers, nous n'avons pas jugé nécessaire d'étalonner les instruments davantage. Il ressort donc que les lasers peuvent mesurer la distance entre un aéronef et une cible bien définie avec un degré de précision acceptable.

Nous avons vérifié jusqu'à quel point le système du CCT pouvait mesurer la hauteur des peuplements forestiers dans la région de Woodroffe (en terrain plat) en établissant des profils verticaux comme celui qui apparaît à la figure 10. Dans ce cas, le profil est inversé car les distances entre les éléments peu éloignés, par exemple entre le couvert forestier et le terrain sous-jacent, sont plus petites et, donc, le profil est plus proche de l'axe des ordonnées. Les profils obtenus ont servi directement à mesurer la hauteur des peuplements après une corrélation approximative avec le terrain étudié. Cette opération a donné des résultats assez fiables lorsqu'il y avait de fréquentes trouées dans le couvert forestier - le rayon laser pouvait atteindre le sol - ou lorsque le profil du terrain était plat et uniforme. Afin de vérifier la hauteur des peuplements calculée à partir des profils, nous avons calculé la hauteur réelle de peuplements à certains endroits précis le long du parcours. Lorsque nous ne pouvions effectuer les mesures sur le terrain à cause de l'impossibilité de repérer le transect au sol ou pour d'autres raisons, nous avons établi un profil photogrammétrique à l'aide du système ordinateur de table-traceur de courbes Stereocord du Service canadien des forêts (figure 11) pour combler ces lacunes et obtenir des données supplémentaires. Ces profils devraient avoir une marge d'erreur de 1 ou 2 mètres quelles que soient les espèces d'arbres en présence. Toutefois, les décidus doivent avoir leurs feuilles car autrement, les images sont peu détaillées; et les petites branches ne peuvent être repérées. Ici, les variations verticales du terrain continuent d'influer sur la précision des résultats, surtout dans le cas des peuplements denses de résineux et là où le relief est très accidenté.

Pour déterminer la précision des profils établis par laser, nous avons comparé la hauteur des peuplements ainsi évaluée avec celle mesurée sur le terrain. L'écart absolu moyen et l'écart-type des différences de précision pour un même point ont servi à exprimer respectivement les composantes systématique et aléatoire de l'erreur. Les résultats, qui apparaissent au tableau 1, révèlent une erreur systématique négative dans la plupart des cas, ce qui signifie que le faisceau laser a été réfléchi non pas par le faîte même des arbres, mais par leur partie supérieure, plus étendue (figure 12). Les émissions laser effectuées à un réglage de 25 mR au-dessus de peuplements de résineux font exception en ce que les échos étaient passablement faibles. Comme prévu, l'erreur systématique est plus importante dans le cas des décidus que dans celui des résineux car les arbres sans feuilles réfléchissaient moins bien l'énergie laser. Il en était de même pour les variations, exprimées par l'écart-type des différences de hauteur. L'utilisation du laser réglé à 5 mR au-dessus de peuplements de résineux a donné les meilleurs résultats: erreur systématique de -0,7 m et erreur aléatoire de ±1,0 m à un écart-type.

Le tableau 2 donne les résultats correspondants de l'essai du système disponible sur le marché au-dessus de l'emplacement 4. Ce laser, caractérisé par une divergence de faisceau de 2 mR, n'a pas détecté les peuplements de décidus sans feuilles, ce qui est justement souhaitable pour un dispositif servant à calculer la distance entre un aéronef et le sol. Dans le cas des peuplements de résineux, l'erreur systématique était d'environ -2,6 m et la

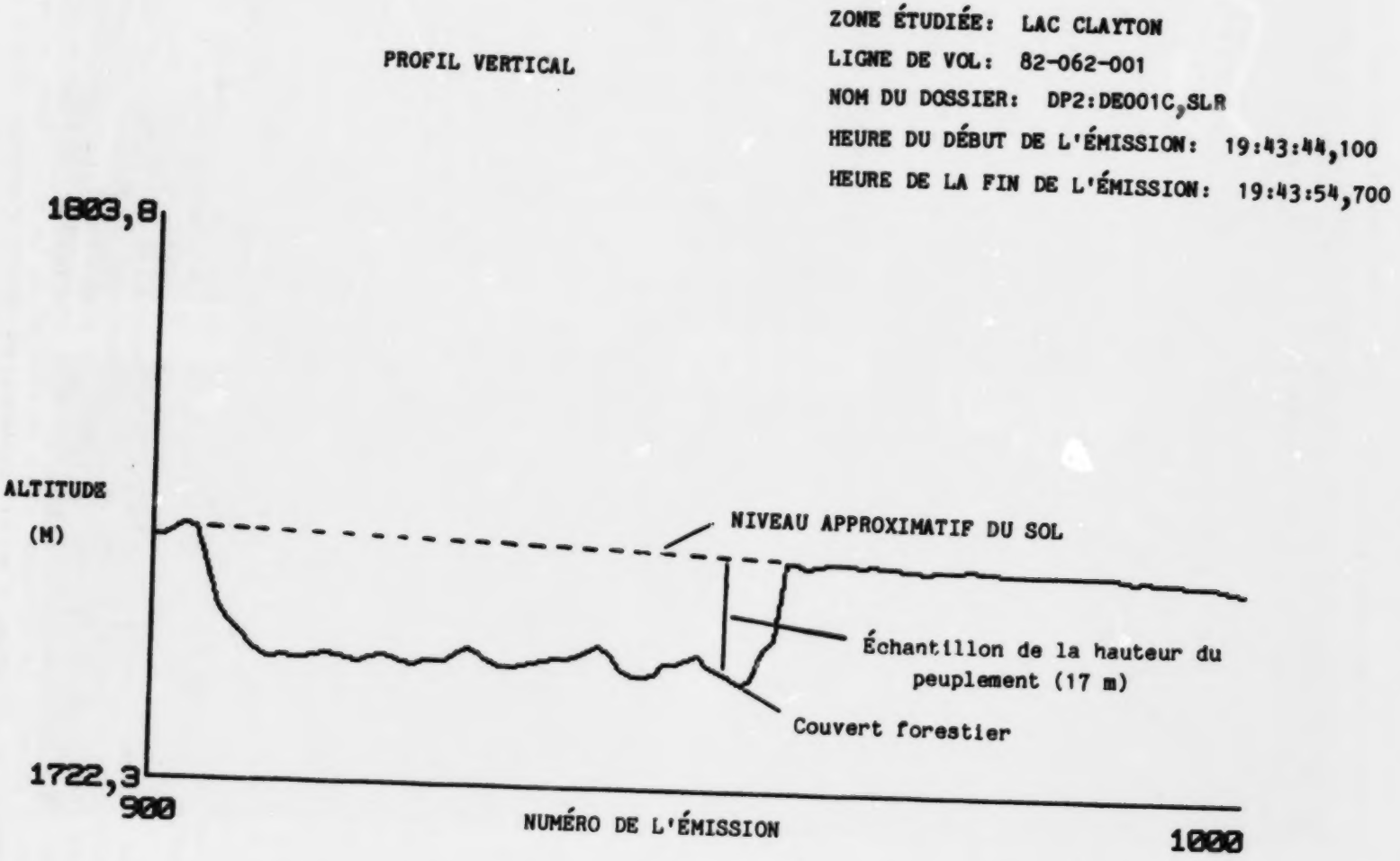


Figure 10. Profil vertical établi à partir de mesures de distance (oblique) effectuées par le bathymètre lidar du CCT. Le profil du couvert forestier et du terrain est inversé.

Figure 11. Profil photogrammétrique d'une partie du transect montré à la figure 10.

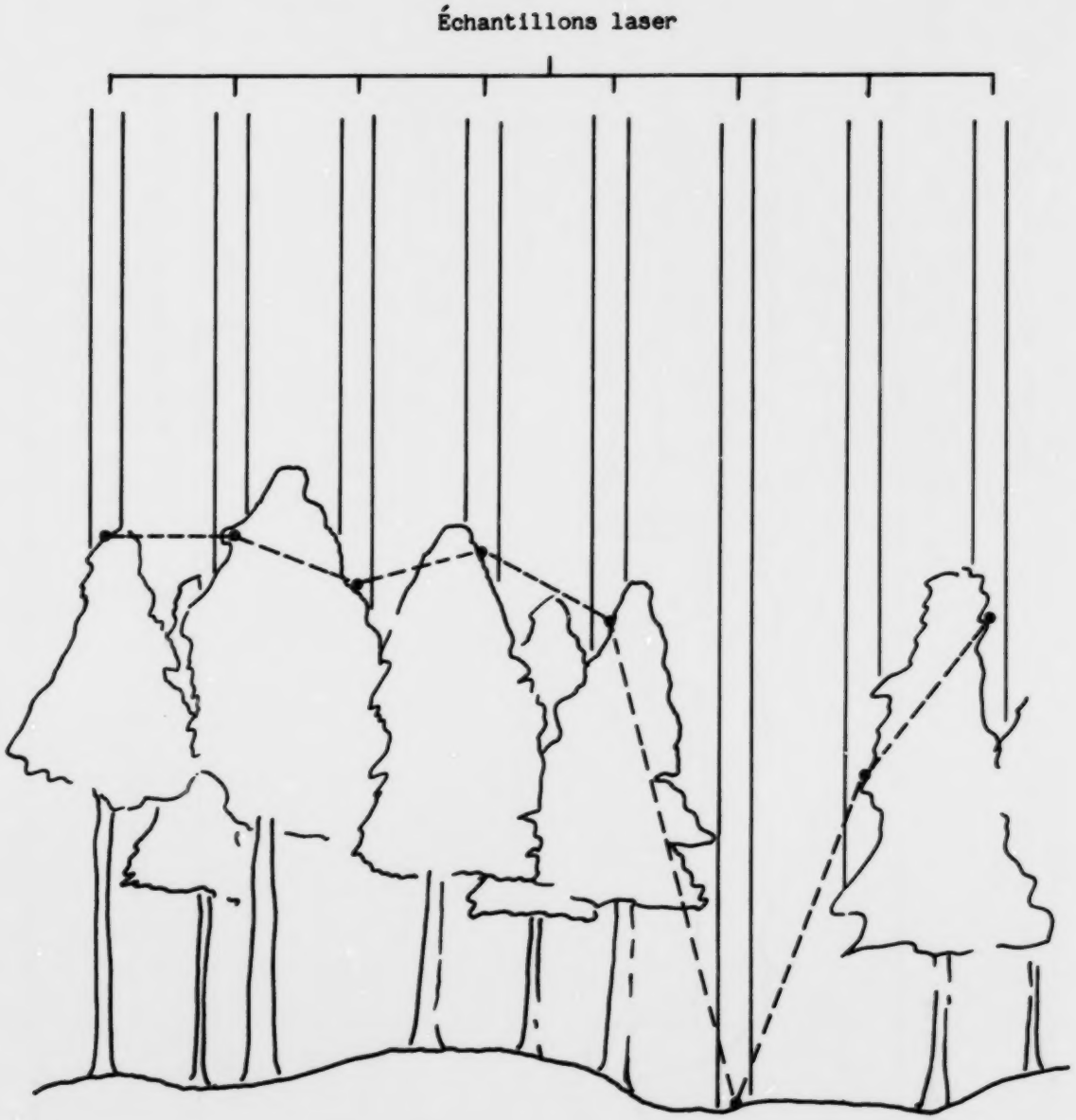


Figure 12. Diagramme montrant la hauteur probable des arbres mesurée par laser. Comme on peut le remarquer, le profil établi à partir des mesures (tirets) équivaut à une sous-estimation de la hauteur générale du couvert forestier.

Tableau 1. Précision des mesures de la hauteur des peuplements forestiers (m) dérivées des mesures des distances par le laser du CCT

	Décidus			Résineux		
Divergence du faisceau (mR)	5	10	25	5	10	25
Moyenne	-8,4	-5,1	-*	-0,7	-1,2	-2,5**
Écart-type des différences	6,0	3,7	-*	1,0	1,0	3,9

* Aucun écho laser.
**Petit échantillon.

Tableau 2. Précision des mesures de la hauteur des peuplements (m) dérivées des mesures effectuées par le laser disponible sur le marché

	Décidus	Résineux
Divergence du faisceau (mR)	2	2
Moyenne	Aucun écho	-2,6
Écart-type des différences		1,2

variation de l'écart-type, d'environ 1,0 m. La valeur passablement élevée de l'erreur systématique est due à la façon dont les cimes coniques des résineux ont été échantillonnées. Avec sa cadence d'échantillonnage de 320 mesures par seconde, le laser disponible sur le marché pouvait mieux traverser les peuplements pour atteindre le sol. Toutefois, comme l'indique la figure 8, dans les peuplements de résineux, des bandes de 100 m de longueur ou davantage sont mal définies et des zones grises encore plus étendues caractérisent les peuplements de décidus portant des feuilles.

L'essai du système du CCT a fourni l'occasion d'étudier la possibilité de dériver la hauteur des peuplements à partir d'échos particuliers. Nous avons calculé l'énergie réfléchie par différentes cibles. La figure 13 montre un écho type renvoyé par un terrain dégagé: en abscisse, la durée en nanosecondes d'un écho et, en ordonnée, l'amplitude de cet écho. L'écho montré dans cette figure est à peu près aussi simple et aussi court qu'on pouvait le prévoir car il correspond à de l'énergie refléchie à un moment donné. En revanche, l'écho apparaissant à la figure 14 est renvoyé par un bâtiment; il est formé de deux sommets, le premier (celui de gauche) correspondant au toit du bâtiment et le second, au sol juste à côté du bâtiment. La figure 4 montre un écho unique et un écho double. En mesurant l'intervalle de temps entre les deux sommets, ou entre deux points définis sur les flancs avant ou arrière des deux ondes, on peut calculer la hauteur des cibles compte tenu des différences d'élévation. En fait, la hauteur du toit du bâtiment par rapport au sol, mesurée par laser (figure 14) équivalait à moins de 50 cm près à celle mesurée sur le terrain et vérifiée par photogrammétrie. La figure 15 montre un écho type provenant d'un peuplement de décidus sans feuilles et la figure 16, un écho type provenant d'un peuplement de résineux. Il convient de remarquer la présence de l'écho double et l'amplitude relativement élevée des deux ondes. Nous avons vérifié l'intervalle de temps entre deux points situés sur le flanc avant des ondes en fonction de différents seuils (p. ex. 20 et 50 %, etc., de la hauteur des ondes jusqu'au maximum) entre les sommets et les flancs arrière. Nous avons constaté que le calcul de l'intervalle de temps entre deux points situés sur les flancs avant donnait les meilleurs résultats, mais le calcul de l'intervalle de temps entre les sommets était presque aussi efficace. Les résultats des calculs effectués en fonction des seuils de 20 % et de 50 % (ce dernier est également appelé moyenne maximale) apparaissent au tableau 3. Les calculs ont donné à peu près les mêmes résultats, bien que ceux effectués en fonction de la moyenne maximale aient donnée un écart-type (erreur aléatoire) légèrement inférieur. Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque la largeur du faisceau était réglée à 25 mR, dans le cas des peuplements de décidus, et à 5 mR dans le cas des peuplements de résineux (Dans ce dernier cas, le réglage à 25 mR donnait une erreur systématique positive inexplicable et un important écart-type.)

Conclusions - Phase 1

Il est peu probable que les mesures de la distance oblique à partir de profilomètres laser fournissent des données fiables sur la hauteur des peuplements, surtout en présence, simultanément, d'un relief très accidenté et de couverts forestiers denses. Toutefois, il a été constaté que le laser disponible sur le marché, dont la cadence impulsionnelle est plus élevée (320 mesures/seconde), traversait le couvert forestier plus fréquemment que celui du CCT (10 mesures/seconde). Le premier ne détecte pas la présence de peuplements de décidus sans feuilles; il permet donc d'établir un profil fiable du terrain,

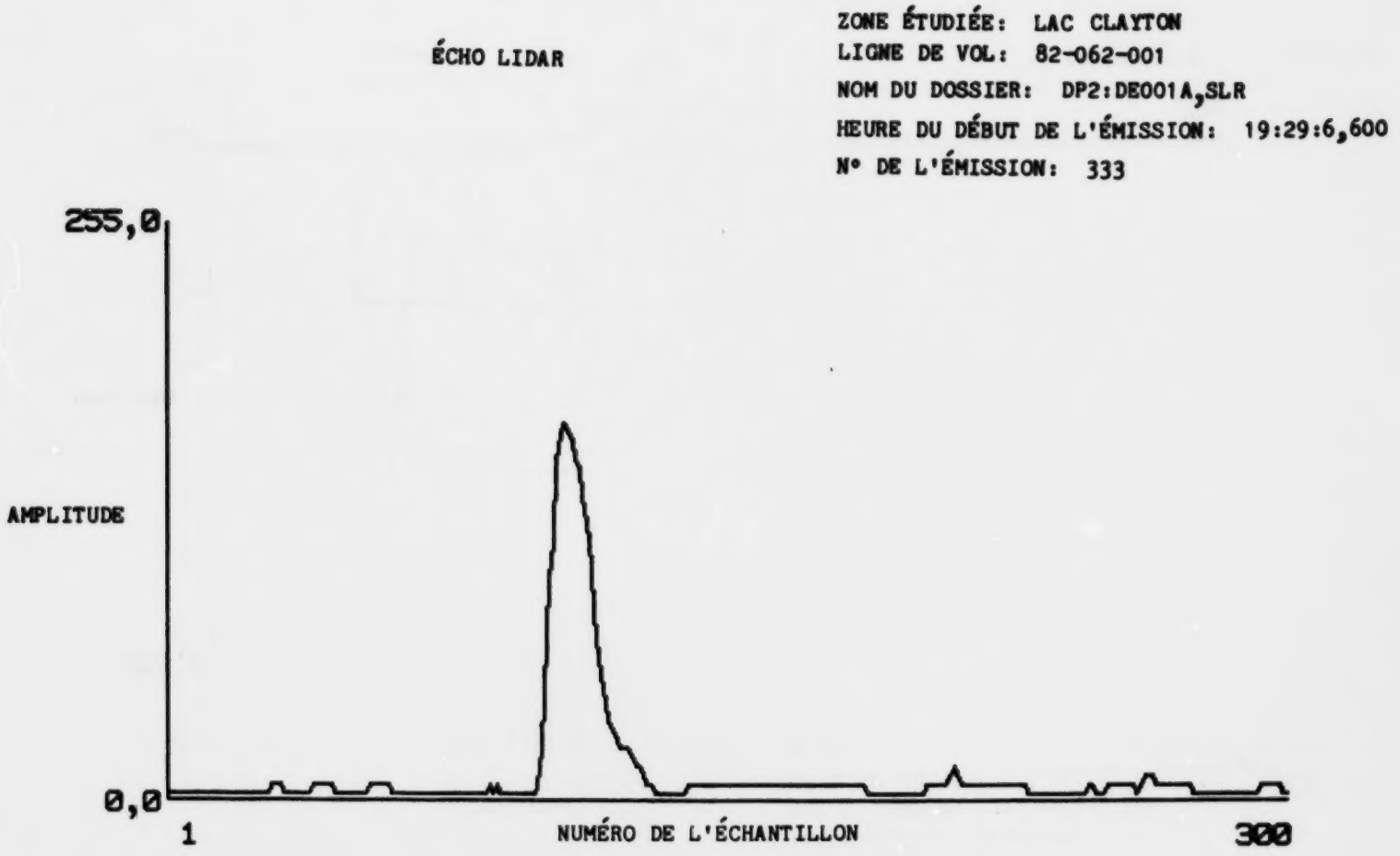


Figure 13. Empreinte type d'un écho laser provenant d'un terrain dégagé.

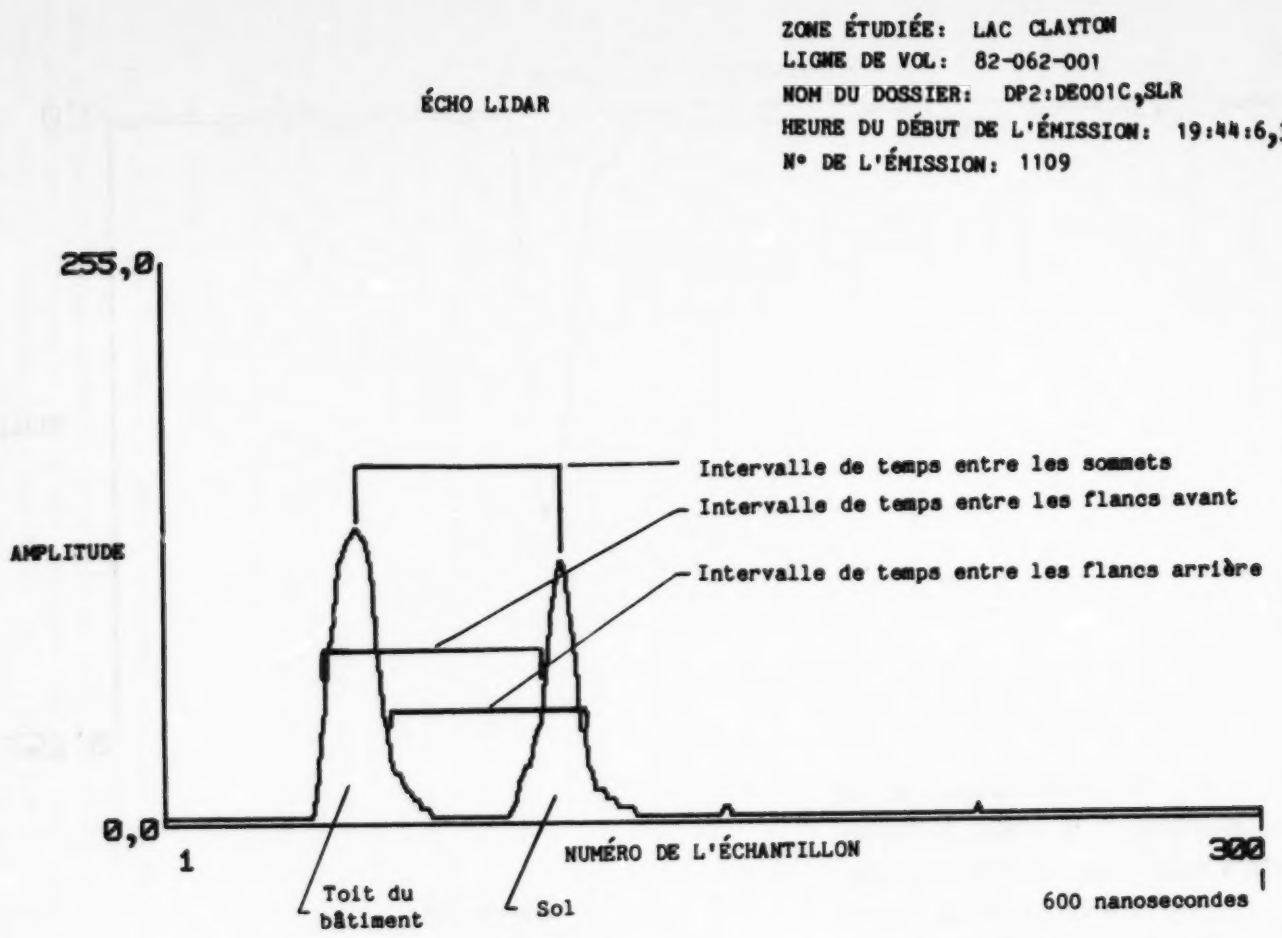


Figure 14. Écho laser provenant du toit d'un bâtiment et du sol voisin. Des intervalles de temps et d'élévation sont dérivés de l'écho double; l'intervalle de temps entre les deux sommets révèle une différence de hauteur d'environ 16 m.

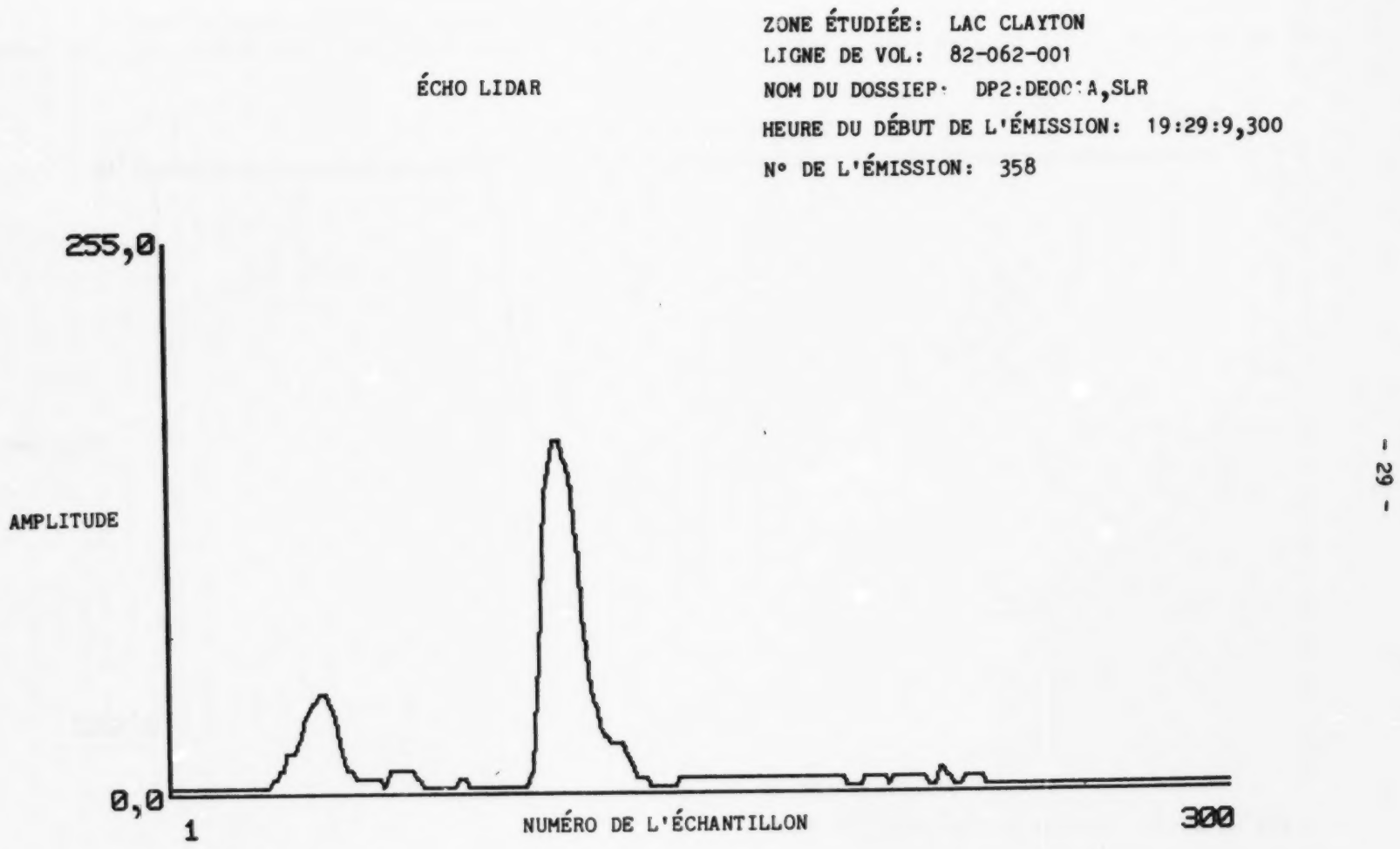


Figure 15. Écho type provenant d'un peuplement de décidus sans feuilles. Remarquer que le couvert forestier renvoie un écho faible et que le sol renvoie un écho relativement fort. Le calcul de la différence de hauteur des sommets révèle une hauteur d'environ 20 m.

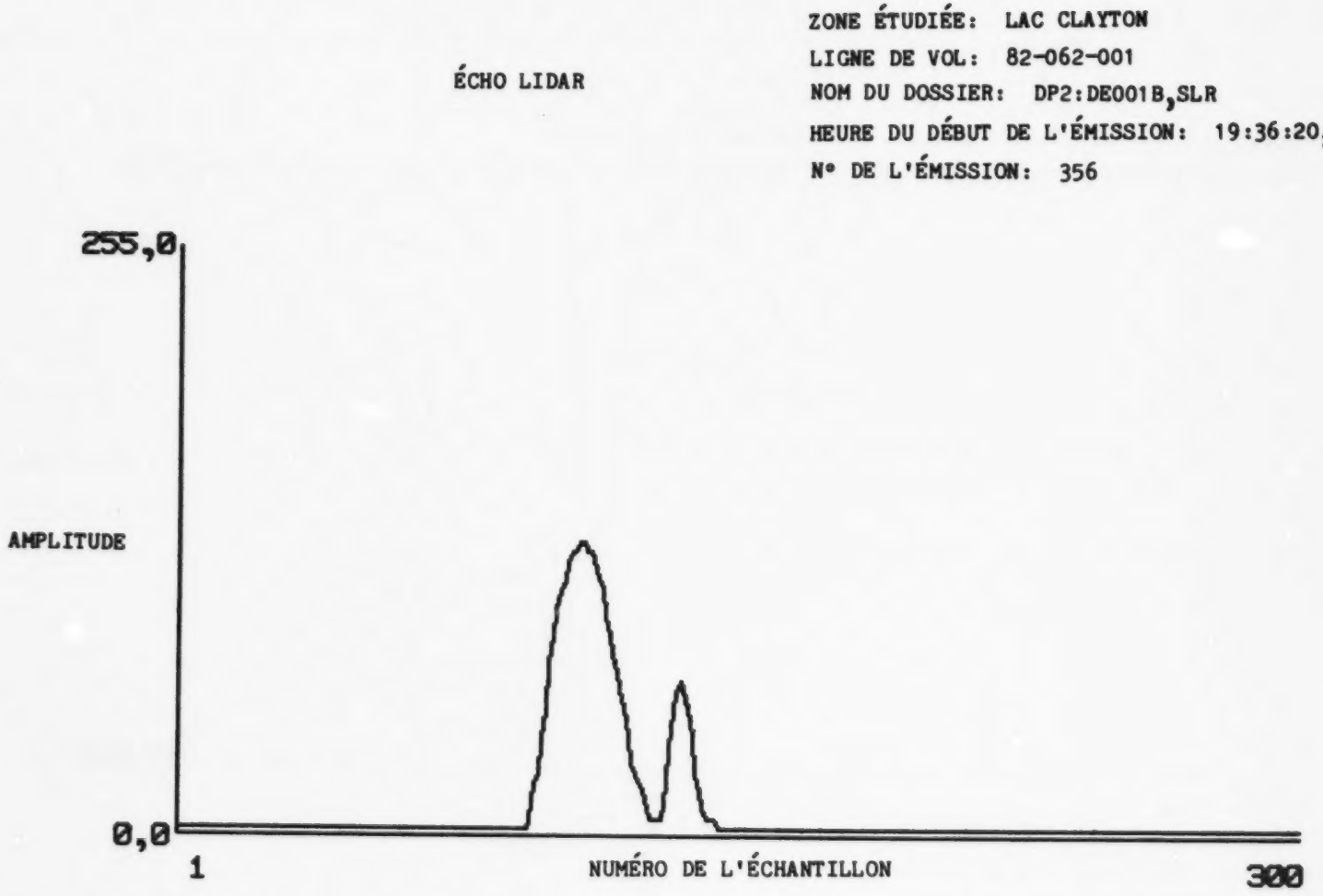


Figure 16. Écho laser type provenant d'un peuplement de résineux. Remarquer la forte amplitude de la première onde et l'amplitude moins élevée de la seconde, qui correspond au sol.

Tableau 3. Précision des mesures de la hauteur du couvert forestier dérivées d'échos individuels

	Décidus			Résineux		
Divergence du faisceau (mR)	5	10	25	5	10	25
Seuil de 20 %						
Moyenne*	-6,6	-5,0	-1,8	-0,2	-0,9	4,4
É-TD**	4,8	3,1	2,8	1,2	1,3	4,9
Seuil de 50 %						
Moyenne	-5,8	-5,2	-0,5	-0,8	-1,2	5,6
É-TD	4,9	2,9	2,6	1,0	1,0	4,9

*Moyenne des différences entre la hauteur des couverts forestiers mesurée par laser et celle mesurée sur le terrain (effet systématique).
**Ecart-type des différences (effet aléatoire).

mais sans fournir de renseignements forestiers. Les décidus foliés constituaient les peuplements offrant le plus de résistance à la pénétration par le faisceau du laser disponible sur le marché. En règle générale, les profils verticaux établis à partir des données télémétriques fournissent peu de renseignements sur les couverts forestiers et ils ne devraient plus être utilisés sauf peut-être pour déterminer le profil des terrains.

Le traitement d'échos individuels semblait être une méthode prometteuse pour les mesures de la hauteur des couverts forestiers (c.-à-d., la pénétration du couvert forestier) et, à partir des valeurs de la distance oblique, pour les mesures altimétriques, même en l'absence d'un couvert forestier. D'après les essais limités que nous avons effectués, le traitement d'échos individuels permet de mesurer la hauteur des peuplements avec une marge d'erreur respective d'environ ±3,0 et ± 1,0 m (niveau de 66 %) pour les peuplements de décidus et les peuplements de résineux. La marge d'erreur plus élevée dans le cas des décidus s'explique par l'absence de feuilles et par le fait que les rameaux et les branches réfléchissent moins bien les signaux. Il semble que la divergence du faisceau et la composition des peuplements influaient sur la précision des mesures de la hauteur. Il faudra faire d'autres essais pour déterminer cette influence avec plus de précision. Les effets systématiques, généralement négatifs, étaient dus en partie au fait que le système ne pouvait détecter les échos provenant du faîte des résineux et des rameaux étroits des décidus sans feuilles, et en partie à la position du point d'impact du faisceau dans le couvert forestier. Les résultats varient selon la largeur du faisceau, la composition des peuplements et la méthode de différenciation des hauteurs. Nous avons considéré qu'il était important d'étudier les facteurs suivants dans les phases ultérieures des travaux: composition des peuplements, densité du couvert de cimes, absence ou présence de feuilles, et relief incliné ou accidenté.

Nous avons également considéré qu'il était souhaitable de modifier le laser disponible sur le marché de manière à pouvoir étudier la forme d'ondes d'échos individuels et ainsi étudier certaines propriétés intéressantes du laser de faible puissance.

Phase 2

ÉLABORATION DE MÉTHODES D'EXTRACTION DES DONNÉES SUR LES PEUPLEMENTS FORESTIERS

D'après les études préliminaires effectuées pendant la phase 1 des travaux, l'étude des formes d'ondes d'échos laser individuels est utile pour le calcul de la hauteur et de la densité des peuplements forestiers. Nous avons constaté qu'une grande partie des impulsions laser traversait les peuplements de décidus sans feuilles et de résineux. Toutefois, de nombreuses questions restaient sans réponse et aucun procédé n'avait été mis au point pour estimer la hauteur et la densité des peuplements forestiers à partir de trains d'échos.

Objectifs

En vue de trouver des réponses à certaines des questions restées en suspens et d'entreprendre la mise au point et l'essai de procédés, nous avons fixé les objectifs suivants pour la phase 2 des travaux:

1. Confirmer les résultats obtenus à la phase 1 par l'exécution d'une deuxième série d'essais indépendants au-dessus des emplacements 1 à 3 déjà choisis. Ces essais étaient conçus de manière à résoudre les problèmes survenus au cours de la phase 1.
2. Développer le traitement d'échos individuels et en faire une vérification plus poussée dans des conditions forestières et topographiques plus variées.
3. De même, pousser la vérification de certaines caractéristiques physiques des systèmes, comme la divergence du faisceau laser.
4. Modifier le laser disponible sur le marché de manière à pouvoir capter et analyser des échos individuels.
5. Faire des essais au-dessus de peuplements de décidus portant des feuilles.
6. Élaborer et vérifier des méthodes de réduction des données pour produire de l'information sur les peuplements forestiers à partir de trains d'échos. Cette opération était destinée à préparer la vérification formelle prévue à la phase 3 en vue d'évaluer l'efficacité des lasers à faisceau impulsionnel pour l'inventaire des forêts.

Méthodologie

Le 13 juillet 1983, le CCT a terminé la deuxième série de vols d'essai au-dessus des emplacements 1 à 3. Il a utilisé l'équipement déjà mentionné, sauf que le laser disponible sur le marché était intégré dans le système. Les paramètres des vols d'essai étaient les mêmes que ceux effectués à la phase 1, à l'exception de l'altitude, qui a été ramenée de 850 à 400 m parce que le fonctionnement du laser disponible sur le marché n'est pas fiable au-dessus de 500 m.

Les vérifications et les analyses, toujours informelles, étaient fondées sur l'approche adoptée à la phase 1. Toutefois, nous nous sommes attachés presque exclusivement à l'analyse d'échos comprenant plusieurs ondes et de l'effet de variables précises, comme la divergence du faisceau laser, des peuplements composés de différentes espèces d'arbres, les effets des saisons

(présence de feuilles), la méthode de réduction des données, et des combinaisons de ces variables. Nous avons étudié ces variables collectivement afin de pouvoir déterminer leurs interactions possibles. Pendant cette étude, nous avons élaboré une méthode pour traiter des trains d'échos à plusieurs ondes et produire des données sur les peuplements forestiers. Les mesures de la hauteur des peuplements ont été analysées avant celles de la densité et de la composition des peuplements.

Nous avons élaboré une méthode statistique pour la vérification et l'évaluation plus formelles de l'efficacité de lasers à faisceau impulsionnel pour les inventaires forestiers. Cette tâche comprenait la formulation d'hypothèses sur le type et la fiabilité des données pouvant être produites. Les vérifications formelles ont eu lieu à la phase 3 (décrites plus bas).

Analyse et résultats

Le laser disponible sur le marché a été modifié, relié au système d'acquisition de données du CCT et utilisé pendant le deuxième vol d'essai. Cependant, il n'a pas produit d'échos dont les ondes pouvaient être analysés, parce que la modification a été apportée au discriminateur intégré dans l'instrument plutôt qu'à la sortie du récepteur.

Nous avons traité ensemble les effets de la divergence du faisceau, de la composition des peuplements et de la présence ou absence de feuilles sur la précision des mesures de la hauteur des peuplements. Pour ce faire, nous avons déterminé les transects relatifs à chacune de ces conditions et nous en avons choisi certains pour les vérifications. À ce stade de vérification informelle, nous n'avons pas fait un choix aléatoire car il fallait d'abord traiter les cas extrêmes.

L'analyse d'échos individuels indique que les résultats obtenus à la phase 2 confirment généralement ceux de la phase 1. Le tableau 4 montre les

Tableau 4. Erreurs systématiques dans les mesures de la hauteur des peuplements dérivées d'échos laser individuels exprimées par la moyenne des différences entre celles-ci et les hauteurs mesurées sur le terrain (m)

	Décidus						Résineux		
	Présence de feuilles			Absence de feuilles					
Divergence du faisceau (mR)	5	10	20	5	10	20	5	10	20
Méthode de discrimination									
Seuil de 20 %	-6,0	-2,4	-1,4	-6,6	-5,9	-1,8	-1,5	-1,6	-1,3
Seuil de 50 %	-6,8	-3,5	-1,7	-5,8	-5,2	-0,5	-1,9	-2,0	-1,7
Différences d'un sommet à l'autre	-7,2	-4,2	-2,9	-9,1	-7,7	-2,7	-2,8	-3,2	-3,2

erreurs systématiques apparaissant dans la détermination de la hauteur des peuplements, erreurs correspondant à la moyenne des différences entre la hauteur dérivée de l'analyse des échos lasers et celle mesurée sur le terrain. Les erreurs systématiques propres aux peuplements de résineux sont demeurées à environ -1,5 m, ce qui indique que les échos détectables ont tendance à provenir d'un niveau quelque peu inférieur à la cime même des arbres. Ce phénomène, observé pendant la phase 1, était anticipé car les cimes réfléchissent naturellement moins d'énergie. Nous avons observé un effet similaire pendant les essais effectués au-dessus de peuplements de décidus; toutefois, l'erreur était fortement influencée par la largeur du faisceau: plus le faisceau était étroit, plus l'erreur était importante. Cette tendance était cependant moins évidente dans le cas des résineux. Pendant la phase 1, on a observé une importante erreur systématique positive et inexpliquée des mesures propres aux peuplements de résineux associée à la largeur de faisceau de 25 mR. Cette erreur n'a pas été observée pendant la phase 2. Les erreurs systématiques associées aux peuplements de décidus portant des feuilles différaient de celles associées aux peuplements dépourvus de feuilles, principalement lorsque la divergence du faisceau était de 10 mR, en ce qu'elle était moins élevée (-2,4 m). Autrement, la tendance à la réduction de l'erreur systématique en fonction de l'augmentation de la divergence du faisceau était quasi identique dans les deux cas.

La composante de l'erreur aléatoire, exprimée par l'écart-type des paires de différences, était petite dans le cas des résineux et beaucoup plus élevée dans le cas des décidus (tableau 5). Cette différence s'explique très probablement par la plus grande uniformité dans la hauteur et la densité du couvert de cimes des peuplements de résineux étudiés (il s'agissait de plantations) et par le fait que les mesures des hauteurs effectuées sur le terrain étaient plus faciles et plus précises. L'erreur aléatoire plus élevée dans le cas des décidus pourrait également s'expliquer par le fait qu'il a été difficile de repérer exactement les empreintes laser et, donc, d'échantillonner de façon représentative la zone touchée par ces empreintes. Dans la première série d'essais, les erreurs aléatoires ne semblaient pas être étroitement reliées à la divergence du faisceau tandis que dans la dernière, l'écart-type des différences diminuait légèrement à mesure que la largeur du faisceau augmentait et ce, tant dans le cas des décidus que dans celui des résineux. Ce phénomène est probablement dû au fait que l'énergie réfléchie par une cible plus étendue crée une <<moyenne>>.

Les erreurs aléatoires associées aux peuplements de décidus portant des feuilles étaient un peu plus élevées que celles reliées aux peuplements sans feuilles (tableau 5). Toutefois, la tendance à la réduction des erreurs aléatoires en fonction de l'augmentation de la largeur du faisceau persistait.

Pendant l'analyse préliminaire d'échos individuels, nous avons vérifié plusieurs facteurs de différenciation des hauteurs à partir des ondes. Les facteurs de différenciation entre les sommets et entre les flancs avant de deux ondes donnaient de meilleurs résultats que les facteurs de différenciation entre les flancs arrières. Pendant cette partie des travaux, nous avons vérifié beaucoup plus de seuils de différences entre les flancs avant des ondes - 1 % jusqu'à 100 % de la hauteur maximale du premier sommet - afin de choisir le seuil optimal. Les différents seuils ont été vérifiés sur 17 échos à plusieurs ondes provenant de peuplements de décidus et de résineux

de hauteur connue. Nous avons établi une régression linéaire entre la hauteur témoin et celle dérivée des échos laser. Une analyse de régression a permis d'examiner les effets scalaires et systématiques et d'évaluer la performance du point de vue de l'erreur résiduelle. Le seuil optimal était considéré comme celui qui comportait une erreur résiduelle minimale. Comme le tableau 6 l'indique, la valeur de l'erreur résiduelle variait relativement peu selon les seuils. Le seuil optimal était à peu près à 85 %, mais le facteur de différenciation entre deux sommets (équivalant au seuil de 100 %) était presque aussi valable. La figure 17 montre la relation de régression au seuil de 85 %. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les hauteurs dérivées des échos laser étaient toujours inférieures d'environ 2 m à celles mesurées sur le terrain. Un effet scalaire minime entrait en jeu.

Nous avons fait l'essai d'autres méthodes d'échantillonnage sur le terrain afin d'améliorer les méthodes servant à représenter la zone touchée par une empreinte laser. Une de ces méthodes consistait à prendre comme hauteur témoin la valeur moyenne d'une grappe de valeurs de hauteur dérivées des échos laser. Les résultats obtenus sont donnés au tableau 7 pour une divergence de faisceau de 5 mR. Cette méthode a permis de réduire légèrement l'erreur systématique, mais l'erreur aléatoire a augmenté quelque peu. En fait, elle n'a pas entraîné une amélioration importante.

Plusieurs autres mesures ont été prises pour augmenter la précision des facteurs de différenciation des hauteurs. Notamment, nous avons établi plusieurs critères permettant de rejeter les échos à onde unique ou les valeurs qui n'entraient pas dans la marge des valeurs anticipées. Par exemple, si des données laser ou d'autres renseignements obtenus préalablement permettaient d'anticiper une hauteur de 20 m, toutes les mesures s'écartant de plus de ±10 m de cette valeur pourraient être rejetées, les mesures retenues servant à réviser la valeur centrale de 20 m. Une fonction de l'écart-type ou une autre expression de variabilité pourrait également servir à réviser la plage des valeurs acceptables. Cette méthode de la <<fenêtre>> a permis de réduire les composantes systématique et aléatoire de l'erreur (tableau 8). Toutefois, le choix d'une fenêtre appropriée était considéré comme arbitraire et il devrait nécessairement varier selon les conditions de la forêt ou du peuplement en présence. Nous considérions que cela était contraire à l'objectif d'évaluation générale de la technologie laser. C'est pourquoi, nous avons décidé de ne pas poursuivre dans cette voie. Néanmoins, dans des cas particuliers, l'utilisation d'une fenêtre minutieusement délimitée pourrait améliorer les résultats de façon notable. Nous avons jugé nécessaire de rejeter les échos à onde unique, qui ne fournissaient aucun renseignement sur la hauteur des peuplements. De toute manière, nous avons dû classer ces échos pour la mesure ultérieure de la densité des couverts de cimes.

Hauteur des peuplements

À mesure que les méthodes de classement des échos étaient élaborées, nous avons négligé l'analyse d'échos à onde unique pour nous concentrer sur l'analyse d'échos à ondes multiples provenant de secteurs relativement uniformes de couverts forestiers. Nos travaux ont surtout porté sur la hauteur des peuplements, mais ils étaient préparatoires à la simulation de la densité des couverts de cimes et du type de couvert. Les méthodes élaborées consistaient à traiter une série d'échos provenant d'un peuplement particulier préalablement délimité sur des photographies aériennes. Les échos, après

Tableau 5. Erreurs aléatoires des mesures de la hauteur des peuplements dérivées d'échos laser individuels, exprimées par l'écart-type des différences (m)

	Décidus						Résineux		
	Présence de feuilles			Absence de feuilles					
Divergence du faisceau (mR)	5	10	20	5	10	20	5	10	20
Méthode de discrimination									
Seuil de 20 %	6,6	5,5	5,1	4,8	3,1	2,8	1,9	1,8	0,7
Seuil de 50 %	6,3	5,7	4,6	4,9	2,9	2,6	1,8	1,6	0,9
Différences d'un sommet à l'autre	6,2	5,5	4,5	7,0	4,4	4,0	1,5	1,4	0,9

Tableau 6. Détermination des seuils

Nombre d'échantillons = 17

Seuil (%)	R^2	Écart-type résiduel
100	0,928	1,721
95	0,929	1,716
90	0,928	1,732
85	*0,930	*1,712
80	0,928	1,728
75	0,926	1,757
70	0,926	1,759
65	0,926	1,753
60	0,924	1,774
55	0,923	1,792
50	0,921	1,807
45	0,920	1,821
40	0,919	1,836
35	0,920	1,827
30	0,919	1,837
25	0,916	1,866
20	0,911	1,920
15	0,909	1,944
10	0,900	2,044
5	0,900	2,042
1	0,910	1,931

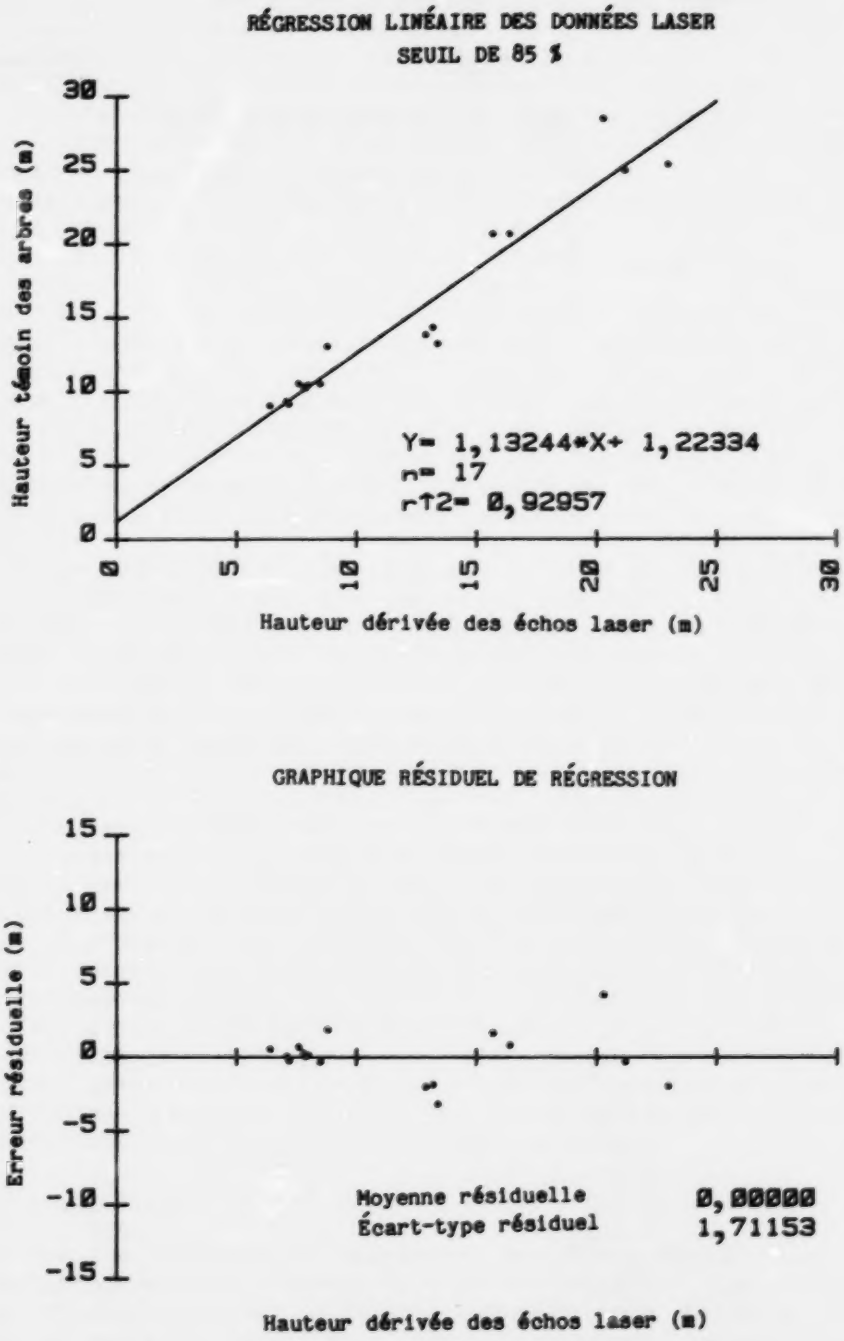


Figure 17. Régression linéaire entre la hauteur des peuplements mesurée sur le terrain et celle dérivée d'échos laser à plusieurs ondes.

Tableau 7. Précision des mesures de la hauteur des peuplements dérivées d'échos à onde unique, comparée avec celle obtenue par des grappes de données obtenues sur le terrain

Divergence du faisceau (mR)	Décidus 5		Résineux 5	
Facteur de différenciation des hauteurs	Données en grappes	Données dispersées	Données en grappes	Données dispersées
Seuil de 20 %				
Différence moyenne	-7,2	-6,0	-1,9	-1,5
Écart-type des différences	6,3	6,6	1,7	1,9
Seuil de 50 %				
Différence moyenne	-7,9	-6,9	2,3	-1,9
Écart-type des différences	6,0	6,3	1,6	1,8

Tableau 8. Différence entre la hauteur des peuplements dérivée d'échos laser par différentes méthodes, et celle résultant de données de contrôle obtenues sur le terrain

	Hauteur moyenne (m)	Critères de rupture: Moyen 67 %	Supérieur 85 %	Sommet 20 %	Sommet 25 %	Non modifié
Résineux	10,4	-2,1	-1,2	--	1,3	-2,2
Décidus	12,9	-3,3	-2,7	-0,0	-0,3	-4,0
Décidus	13,1	0,6	2,0	6,1	5,7	0,3
Décidus	9,2	-2,6	-1,5	2,2	1,7	-2,2
Décidus	14,2	-0,0	0,6	4,0	3,6	-0,8
Décidus	10,5	-1,9	-1,0	2,2	1,9	-2,1
Décidus	13,8	-0,5	0,3	3,8	3,5	-0,9
Résineux	10,3	-2,0	-1,7	-0,3	-0,5	-2,2
Décidus	28,4	-6,2	-5,8	-2,2	-2,6	-8,1
Résineux	10,2	-1,6	-1,4	-0,4	-0,5	-1,9
Décidus	24,8	-2,0	-1,7	1,4	1,1	-3,4
Résineux	10,4	-1,5	-1,4	-0,7	-0,8	-1,6
Moyenne de la différence =		-1,9	-1,3	1,4	1,1	-2,4
Écart-type de la différence =		1,7	1,9	2,5	2,3	2,1

avoir été soumis au discriminateur de hauteurs, ont été classés en échos à ondes multiples ou en échos à onde unique. Ces derniers étaient traités comme s'ils ne fournissaient aucune information sur la hauteur des peuplements. Par la suite, les échos à ondes multiples ont été soumis à un classement plus approfondi: échos à deux ondes, à trois ondes, à quatre ondes, ou à plus de quatre ondes. Les première et dernière ondes ont servi, avec le seuil de 85 % (facteur de discrimination), à produire des valeurs de hauteur qui, avec d'autres, ont permis d'établir une moyenne pour estimer la hauteur des peuplements.

Les résultats donnés au tableau 9 et illustrés à la figure 18 concordaient généralement avec ceux de l'analyse d'échos à onde unique. Toutefois, dans le tableau 9, les principaux effets systématiques ont été isolés et supprimés étant donné qu'ils étaient considérés comme persistants. Les effets indiqués sont des effets résiduels qui demeuraient après l'adjustement. Nous

Tableau 9. Précision des mesures de la hauteur des peuplements dérivées de trains d'échos laser selon une faible divergence de faisceau et trois classes de cimes

Divergence du faisceau	Type d'erreur	Peuplements Décidus	mixtes	Résineux	Combinés
1 mR	Moyenne[1]	0,8	-2,1	1,8	-1,3
	É.-T.[2]	2,0	1,2	-[4]	1,9
	E.-T.[3]	2,1	2,4	-	2,2
2	Moyenne	5,1	-2,0	-1,1	-1,3
	É.-T.	-	1,6	-	2,6
	E.-T.	-	2,6	-	2,9
5	Moyenne	-1,3	-1,2	1,5	-1,0
	É.-T.	2,1	3,2	-	2,5
	E.-T.	2,5	3,4	-	2,7
10	Moyenne	0,9	0,2	-0,2	0,4
	É.-T.	1,8	1,1	-	1,3
	E.-T.	2,2	1,1	-	1,4
20	Moyenne	1,3	1,3	1,0	1,3
	É.-T.	2,2	1,1	1,1	1,4
	E.-T.	2,6	2,0	1,5	1,9
Toutes divergences combinées	Moyenne	0,4	-1,0	0,7	
	É.-T.	2,4	2,0	1,2	
	E.-T.	2,4	2,2	1,6	

[1]Moyenne de la différence entre la hauteur des peuplements mesurée par laser et la hauteur de contrôle.
[2]Écart-type des différences.
[3]Erreur-type.
[4]Données insuffisantes.

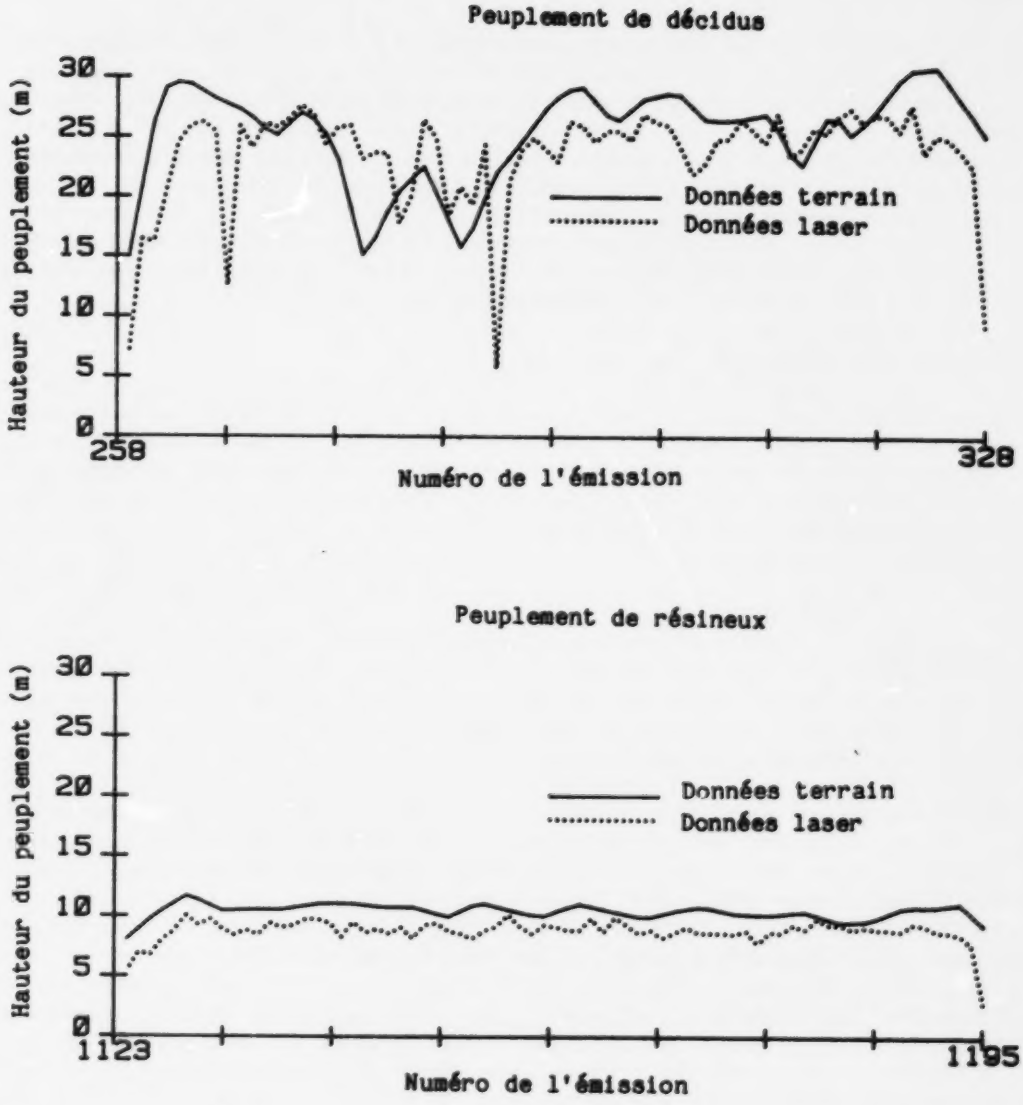


Figure 18. Profils de peuplements de décidus et de résineux établis par des mesures sur le terrain, comparés avec ceux résultant de mesures au laser.

avons calculé l'erreur-type (tableau 9) pour refléter l'effet conjoint de l'erreur systématique, non considérée, et de l'erreur aléatoire des mesures. À ce stade, l'erreur-type était une quantité utile pour la mesure de la précision. Ainsi, une erreur-type de 2,4 pour tous les peuplements de décidus signifie que les deux tiers du temps, les valeurs estimatives de la hauteur des peuplements ne devraient pas s'écarter de plus de ±2,4 m de la hauteur réelle.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'erreur des mesures de la hauteur des peuplements diminuait à mesure que la teneur en résineux augmentait. Dans le cas des peuplements composés exclusivement de résineux, l'erreur-type était d'environ 1,6 m; toutefois, il existait peu de données sur ces peuplements. Cette lacune nous a empêché de tirer des conclusions définitives sur l'effet combiné de la présence d'espèces de résineux et de différents réglages de la divergence du faisceau laser. Dans le cas des peuplements de décidus et des peuplements mixtes, la largeur du faisceau avait une influence minime sur la précision des mesures, bien que l'erreur-type reliée à une divergence de 10 mR ait été légèrement moins élevée.

Profils des peuplements et des terrains

Nous avons établi les profils des peuplements et des terrains en pointant les données propres aux faisceaux infrarouge et vert du système laser. Le faisceau infrarouge était assorti d'un discriminateur rupteur qui, dès que l'écho revenait, convertissait le temps écoulé en une valeur de distance oblique qu'il stockait sous le numéro d'émission approprié. Comme aucune donnée sur les angles de tangage et de roulis n'était disponible, nous n'avons pu apporter de corrections en fonction de la distance oblique pour pouvoir tenir compte des variations de l'altitude de vol. Avant d'être pointées, les valeurs de distance oblique ont été divisées par deux de manière à déterminer la distance entre l'aéronef et la cible au sol. Dans le graphique de la figure 19, ces valeurs converties correspondent à la ligne continue qui montre le profil des objets détectés le long de la ligne de vol. Les figures 20 et 21 donnent d'autres profils de peuplements forestiers.

Après avoir converti en valeurs de hauteur les données obtenues par l'émission du faisceau vert, nous les avons pointées sous forme de lignes pointillées verticales au-dessous du profil de la distance oblique. Ensuite, nous avons relié les bases des lignes verticales pour réaliser le profil du terrain sous-jacent au couvert forestier. Cependant, tout point correspondant à une valeur extrêmement supérieure ou inférieure aux points voisins n'a pas servi à l'établissement du profil du terrain. Cela a permis d'éviter les variations ou les distorsions abruptes des profils des terrains causées par les impulsions qui ne pouvaient traverser complètement le couvert forestier.

Densité des couverts de cimes

Pour estimer la densité des couverts de cimes des peuplements, nous avons utilisé la même méthode et les mêmes variables que pour la mesure de la hauteur des peuplements. Les variables suivantes ont été étudiées:

Échos manquants: Pourcentage du nombre total d'échos à onde unique renvoyés par un peuplement

Sommet 1:	Amplitude moyenne maximale des échos renvoyés par un couvert forestier (établie sur tous les sommets à l'exception du dernier)
Sommet 2:	Amplitude moyenne maximale de l'écho renvoyé par le sol (dernier sommet)
Rapport d'amplitude:	Rapport d'amplitude moyen des ondes correspondant à la distance entre le sol et le sommet du couvert forestier
Nombre de sommets:	Nombre moyen de sommets dans un écho à plusieurs ondes
Superficie totale:	Superficie totale moyenne touchée par l'écho
Superficie du sol:	Superficie moyenne de la partie du sol comprise dans un écho à plusieurs ondes (c.-à-d. le dernier sommet)
Superficie du couvert:	Superficie moyenne de la partie d'un écho à plusieurs ondes correspondant au couvert forestier
Hauteur:	Hauteur moyenne du peuplement

La figure 22 montre le calcul de certaines de ces variables.

Comme nous l'avons expliqué, les valeurs témoins servant à la mesure de la densité du couvert de cimes ont été établies par photogrammétrie: la partie du transect touchant des cimes vivantes a été mesurée et exprimée en pourcentage de la longueur totale du transect. Nous avons constaté que cette méthode permettait le mieux de contrôler visuellement les mesures de densité dérivées des données laser.

Les relations entre la densité du couvert de cimes et les variables laser ont ensuite été analysées par des techniques de corrélation et de régression. L'influence possible de la divergence du faisceau laser a également été examinée. Les relations ont été établies en termes de <<qualité de l'ajustement>> exprimée par l'erreur-type de régression. Les mèilleurs modèles tenaient toujours compte de l'écho manquant et de l'amplitude moyenne de l'écho renvoyé par le sol. Plus la proportion d'échos à onde unique était élevée, moins le peuplement était dense, et plus l'écho renvoyé par le sol était faible, plus le peuplement était dense.

Nous avons fait beaucoup d'expériences à différents réglages de la divergence du faisceau et vérifié les modèles les plus prometteurs dans chaque cas. Les résultats indiquent que la performance des modèles variait selon le réglage de la divergence. Le tableau 10 montre les variables étudiées et les erreurs résiduelles correspondant à chacun des cinq réglages. De toute évidence, le modèle fondé sur une réglage de 5 mR s'est révélé le plus efficace. Outre le nombre d'échos à onde unique et l'amplitude maximale moyenne de l'écho renvoyé par le sol (sommet 2), le sommet 1, le rapport d'amplitude et la superficie du couvert forestier ont grandement aidé à estimer la densité du couvert de cimes. D'après les résultats des essais effectués au-dessus de 24 peuplements pour chaque réglage de la divergence du faisceau, il apparaît que 95 % du temps, l'écart entre les mesures laser du couvert de cimes et les valeurs témoins est de ±15 % au maximum.

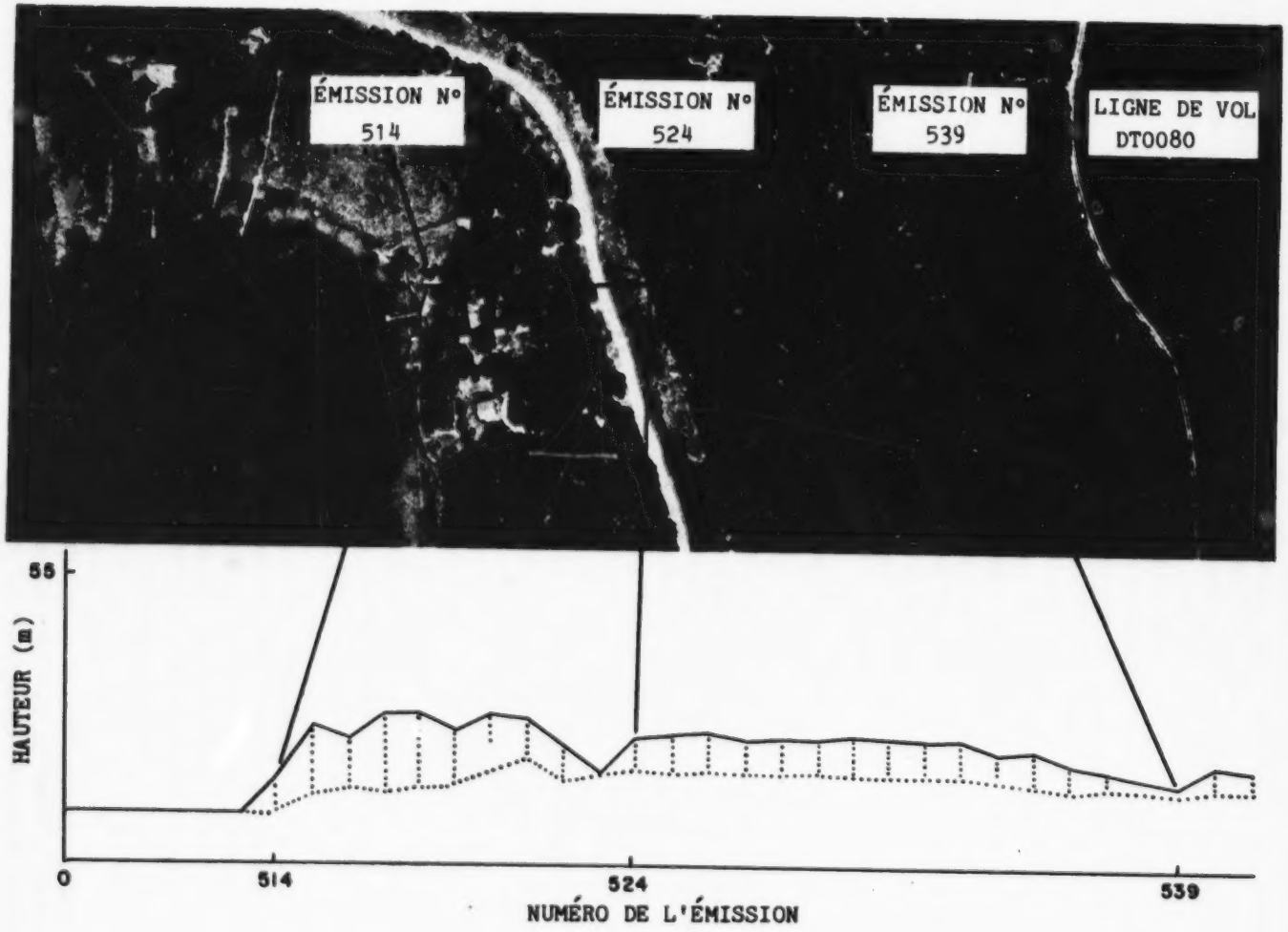


Figure 19. Partie du haut: illustration de l'empreinte laser pointée sur une photographie aérienne prise pendant un vol d'essai. Partie du bas: profils d'un couvert forestier et du terrain sous-jacent établis le long de la ligne de vol à partir des mesures laser de la distance entre l'aéronef et le couvert forestier, et hauteur du peuplement résultant du traitement d'échos laser à plusieurs ondes.

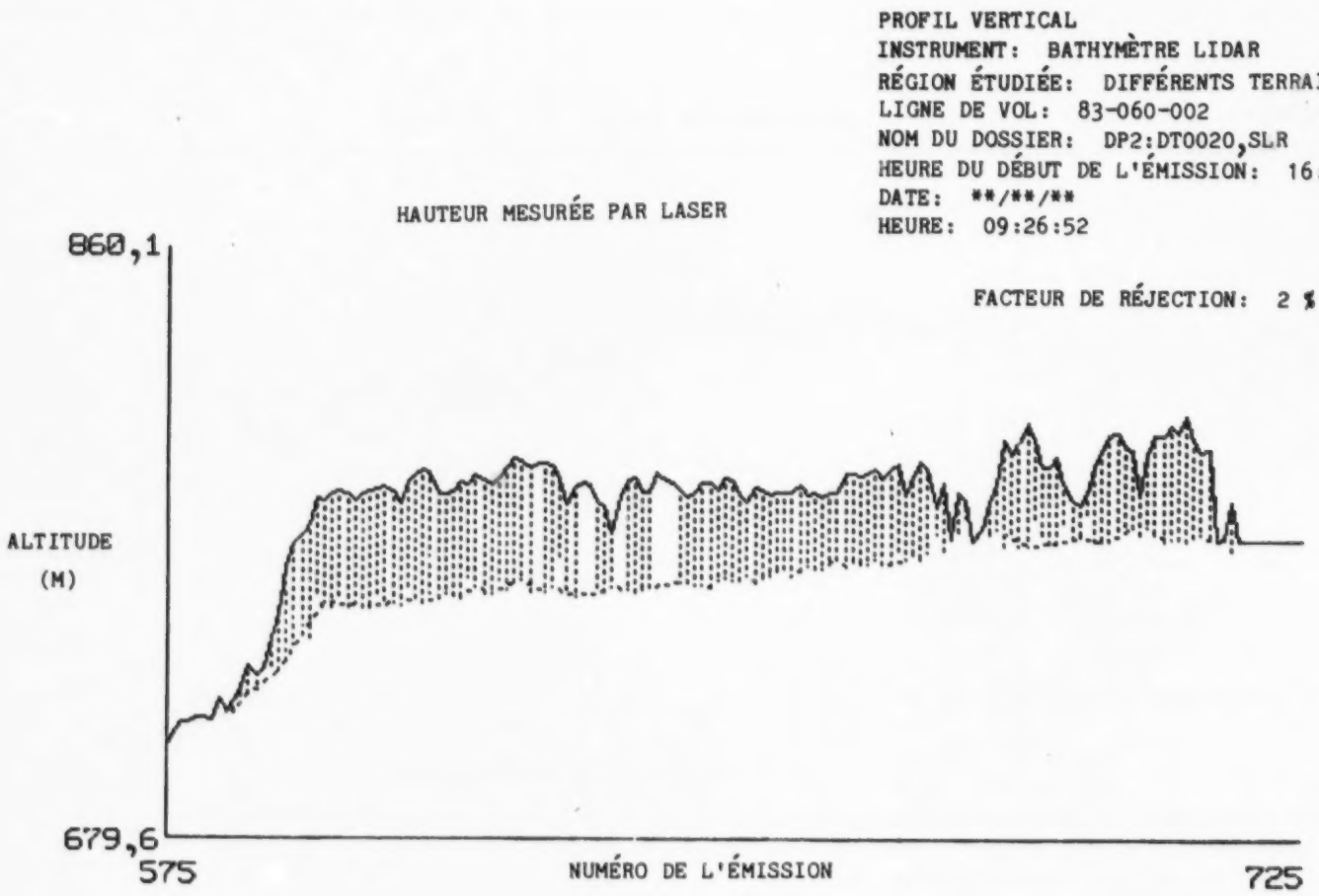


Figure 20. Profils d'un terrain et d'un peuplement de décidus établis à partir du premier et du dernier échos d'une émission et de données altimétriques. Environ 15 % des impulsions n'ont pas traversé le couvert forestier jusqu'au sol.

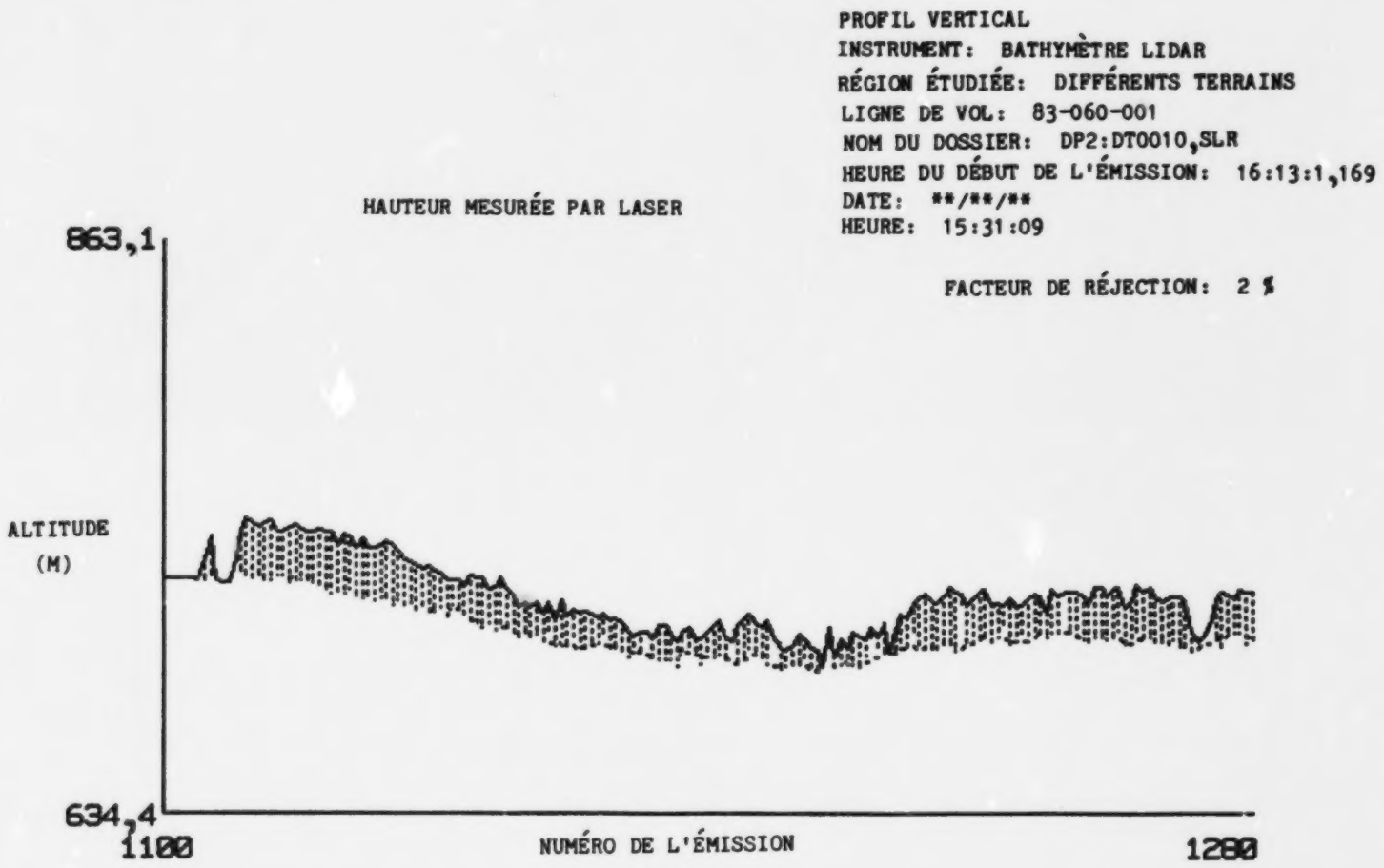


Figure 21. Profils de terrains et de peuplements de résineux produits à partir du premier et du dernier échos et de données altimétriques. Environ 5 % des impulsions n'ont pas traversé le couvert forestier jusqu'au sol.

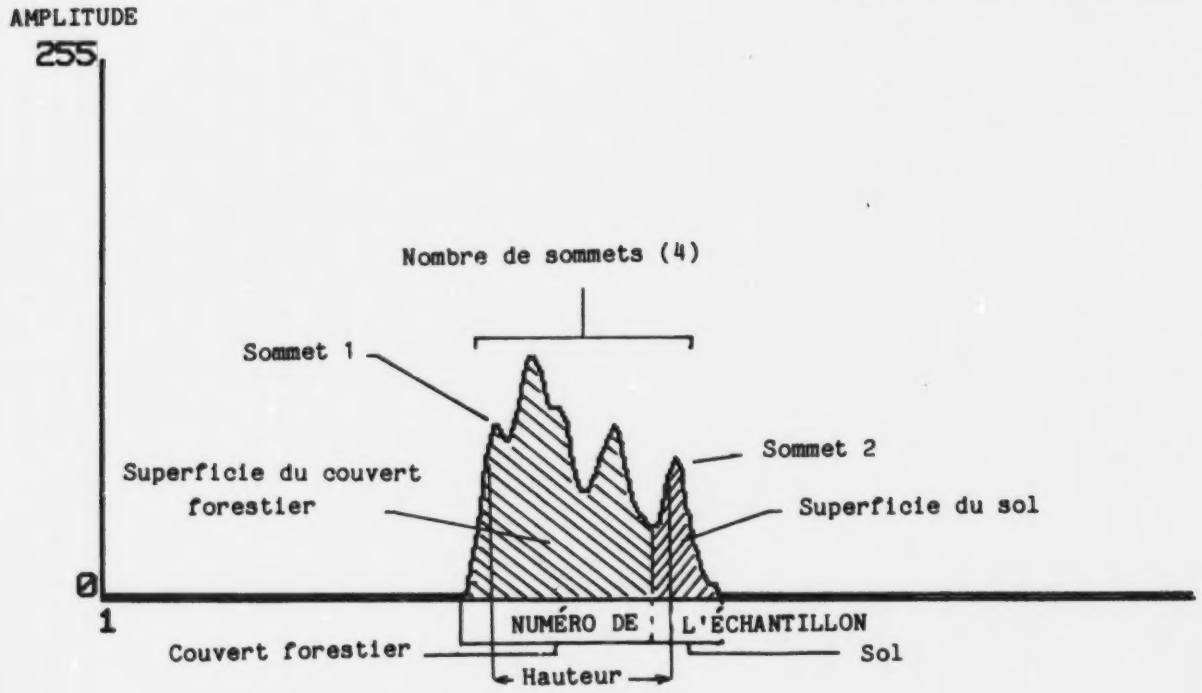


Figure 22. Écho à plusieurs ondes montrant certaines des variables utilisées pour l'estimation de la densité des couverts de cimes.

Prévision du type de couvert forestier

Les peuplements utilisés pour l'établissement des équations de régression sur la densité ont également servi à vérifier le potentiel de prévision du type de couvert forestier par détection laser. Un spécialiste de la photo-interprétation a examiné la bande de terrain correspondant à l'empreinte laser le long de chaque ligne de vol au-dessus de chaque peuplement étudié, en fonction de quatre classes standard de type de couvert:

Classe	Description
H	76 à 100 % de décidus selon le couvert de cimes
HS	51 à 75 % de décidus selon le couvert de cimes
SH	26 à 50 % de décidus selon le couvert de cimes
S	0 à 25 % de décidus selon le couvert de cimes

Pour vérifier l'efficacité de l'algorithme de classement des sommets d'ondes, nous avons placé les données laser dans les quatre classes de type de couvert forestier et nous les avons comparées avec la distribution de fréquence du peuplement en question au moyen de matrices de corrélation. Nous avons constaté, entre autres, que les échos à trois sommets n'étaient pas influencés par le type de couvert forestier, de sorte que seuls les échos à deux sommets et ceux ayant plus de trois sommets pouvaient être classés. D'autres variables, telles que le rapport d'amplitude des ondes, l'amplitude moyenne de l'écho renvoyé par le sol et les caractéristiques des zones renvoyant les échos, ont été vérifiées, mais elles ne permettaient pas d'utiliser le classement par type de couvert forestier. La variable donnant les meilleurs résultats était celle du nombre de sommets. Néanmoins, l'utilisation de ce modèle a entraîné une grande confusion entre les classes HS et SH. En conséquence, nous avons fusionné ces deux classes, qui sont devenues la classe des peuplements mixtes. Les vérifications du modèle en fonction des trois classes restantes révèlent que celui-ci est efficace pendant à peu près 50 % du temps. Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque la divergence du faisceau était réglée à 10 mR.

Conclusions - Phase 2

Les vérifications faites à la phase 2 ont confirmé que le traitement d'échos laser à ondes multiples peut produire des données utiles sur les peuplements forestiers, en particulier la hauteur des peuplements. Des renseignements utiles peuvent également être obtenus au sujet de la densité et de la composition des peuplements. Il est reconnu que la hauteur et la densité des peuplements dépendent d'autres variables, comme le volume et la biomasse, mais ces calculs n'entraient pas dans le cadre de nos travaux. À ce stade, nous avons pu déterminer la configuration matérielle, les paramètres de vol et les méthodes de traitement des signaux laser appropriés, même si certains travaux d'étalonnage et d'ajustement s'imposaient encore.

Nous avons constaté que la plus grande diversité des conditions forestières (composition et densité des peuplements, présence ou absence de feuilles et topographie) avaient un effet minime sur la précision des mesures de hauteur. Toutefois, la divergence du faisceau laser avait une grande influence sur la précision des mesures de la hauteur des peuplements de

décidus: plus le faisceau était large, moins les erreurs systématiques et aléatoires étaient importantes. D'autre part, la précision des mesures de la hauteur des peuplements de résineux n'était pas aussi clairement influencée par la divergence du faisceau. Pour l'établissement de profils des peuplements, les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque le faisceau était étroit.

Les tentatives visant à modifier le laser disponible sur le marché de manière que les caractéristiques des échos puissent être détectées par le système aéroporté d'acquisition de données du CCT ont été infructueuses en raison d'une mauvaise modification des composantes électroniques. À ce stade, il était prévu de résoudre le problème de jonction et de répéter le vol d'essai au-dessus des emplacements dans la région.

Le principal objectif de la phase 2 consistait à élaborer des méthodes de production de données sur les peuplements à partir d'une série d'échos individuels. Pour ce faire, nous avons mis au point une méthode d'analyse quantitative de chaque écho en fonction de neuf critères pouvant présenter un intérêt. Ces critères étaient fondés sur les caractéristiques des échos, comme le nombre de sommets, l'amplitude maximale de certaines ondes, le rapport d'amplitude maximale entre des paires de sommets - en tenant compte surtout du dernier sommet (onde renvoyée par le sol) -, la zone située sous les courbes, et d'autres caractéristiques déjà définies.

La meilleure méthode d'estimation de la hauteur des peuplements consistait à classer les échos à plusieurs ondes selon le nombre de sommets, à choisir le premier et le dernier sommets et à utiliser le facteur de différenciation des hauteurs sur le flanc avant des ondes (85 %) pour mesurer le temps écoulé entre les ondes en vue de déterminer la hauteur. La hauteur estimative d'un peuplement était la moyenne de toutes les mesures valables de hauteur faites pour ce peuplement.

Deux fois sur trois, la marge d'erreur de ces estimations devrait généralement être de ±2 m. Il est possible d'atteindre une plus grande précision en utilisant des délimiteurs pour supprimer les mesures extrêmes dans un peuplement, mais nous avons jugé cette méthode trop arbitraire pour l'évaluation générale du rendement des lasers à faisceau impulsionnel. Dans des cas précis, la marge d'erreur, exprimée en termes de l'erreur-type, a pu être réduite à environ ±1,5 m par l'utilisation de délimiteurs.

Nous avons étudié brièvement le potentiel des lasers à faisceau impulsionnel pour l'établissement de profils de peuplements et des terrains sous-jacents (voir les figures 20 et 21). Nous n'avons pas déterminé la précision réelle des profils car il nous aurait fallu connaître la position exacte de l'aéronef au-dessus des peuplements étudiés. Si cette position peut être déterminée avec suffisamment de précision, l'élévation des terrains pourrait être mesurée avec une marge d'erreur de ±1,0 m dans les zones dégagées et probablement de ±3,0 m ou moins dans les zones boisées.

Les paramètres les plus efficaces pour la mesure de la densité des couverts de cimes étaient le nombre d'échos à onde unique, l'amplitude maximale des échos renvoyés par les couverts forestiers et le sol, ainsi que le rapport entre les deux échos et la partie de l'écho correspondant à la superficie du couvert forestier. L'influence de la divergence du faisceau était

moyenne, mais le réglage de la largeur du faisceau à 5 mR donnait les meilleurs résultats. Dans les conditions optimales, la densité des couverts de cimes de peuplements mixtes peut être estimée avec une marge d'erreur de ±15 % à un niveau de confiance de 95 %. Ce dernier modèle était considéré comme le meilleur pour les tests statistiques plus formels prévus à la phase suivante.

Les données dérivées des échos à plusieurs ondes étaient les plus efficaces pour la prévision des types de couvert forestier. L'utilisation de classes HS et SH distinctes a entraîné beaucoup de confusion. Toutefois, après que celles-ci eurent été fusionnées, le classement était correct environ une fois sur deux. S'il avait été fait au hasard, le classement aurait été correct dans environ 33 % des cas. C'est pourquoi nous n'avons pas considéré ces résultats comme valables.

Les conclusions relatives à l'utilisation de données produites par des systèmes laser à faisceau impulsionnel pour estimer la hauteur des peuplements forestiers et la densité des couverts de cimes et pour établir des classes de types de couvert forestier n'étaient pas définitives. C'est pourquoi la phase suivante des travaux avait pour objet de soumettre les résultats obtenus à des tests statistiques plus formels.

Phase 3

LES TESTS FORMELS

Les deux premières phases des travaux visaient à étudier la possibilité de produire des renseignements forestiers de base au moyen de systèmes laser à faisceau impulsionnel. L'analyse des formes d'ondes d'échos individuels a donné des résultats particulièrement prometteurs. Des méthodes d'extraction des données ont été élaborées et soumises à des tests informels puis raffinées ou modifiées selon ce que les résultats préliminaires indiquaient. Nous avons élaboré et vérifié des méthodes permettant de dériver des données sur les peuplements forestiers à partir de trains d'échos. Ensuite, nous avons posé plusieurs hypothèses sur l'information fournie par les données laser, hypothèses que nous avons soumises à des tests statistiques plus formels.

Objectifs

L'information considérée comme la plus précieuse était la hauteur moyenne du couvert forestier et la possibilité d'établir des profils verticaux des peuplements. L'information sur la densité des couverts de cimes était également considérée comme fondamentale à cause de ses liens avec le matériel sur pied (mesure de la quantité de bois sur une surface donnée). La possibilité d'extraire des données sur la composition des peuplements était également considérée comme un facteur important. En conséquence, nous avons formulé les trois hypothèses suivantes:

1. Il est possible de calculer la hauteur moyenne des principaux couverts forestiers à partir de trains d'échos laser et, dans 95 % des cas, les valeurs obtenues peuvent concorder avec les mesures du même couvert forestier effectuées sur le terrain ou à partir de photographies de grande échelle, avec une marge d'erreur maximale de ±5 m.

Il est reconnu qu'on peut mesurer la hauteur d'arbres dans un peuplement à partir du sol ou de photographies de grande échelle avec une marge d'erreur de ±2 m (niveau de 95 %) ou moins (Aldred et Lowe, 1978). Ordinairement, il est possible d'estimer la hauteur moyenne des peuplements avec une marge d'erreur de ±3 ou 4 m à partir de mesures d'arbres qui s'y trouvent. Des photographies aériennes à l'échelle de 1:15 000 à 1:20 000 peuvent servir à estimer la hauteur des peuplements avec une marge d'erreur de ±5 m, pourvu que des ouvertures dans les cimes permettent d'apercevoir le sol sous-jacent. Les classes de hauteur de cinq mètres sont à peu près les plus petites qui sont utilisées pour le classement des peuplements forestiers pour des fins de gestion et d'exploitation. C'est à partir de ces considérations que nous avons établi notre marge d'erreur maximale à ±5 m.

2. Les valeurs de la densité moyenne des peuplements forestiers (exprimée en termes de densité du couvert de cimes) peuvent être divisées en classes de 20 % qui concordent avec les photo-interprétations dans au moins 80 % des cas.

Pour les besoins de l'évaluation, nous avons établi des classes de 20 %, les plus couramment utilisées pour le classement et la cartographie des peuplements forestiers.

3. Les trois classes de types de couvert forestier (décidus, résineux et peuplements mixtes) peuvent être déterminées par laser de manière que les résultats concordent dans 80 % des cas avec les photographies aériennes ou les mesures sur le terrain.

Les classes spécifiques de densité et de types de couvert forestier sont définies plus bas.

Méthodologie

Les données recueillies pendant les deux vols d'essai des deux premières phases des travaux ont été divisées en deux ensembles, l'un destiné à l'élaboration de méthodes et aux tests préliminaires et l'autre étant réservé spécialement pour l'évaluation des méthodes élaborées, dont il sera question ci-dessous.

À l'aide du second ensemble de données, nous avons rétabli l'empreinte laser le long des transects, sur lesquels nous avons pointé les émissions laser. Des parties de transects touchant des peuplements particuliers ont été retenues. Leurs limites correspondaient à des points où il y avait de changements abrupts dans le type de couvert forestier ou dans la hauteur ou la densité des peuplements, ou aux endroits facilement reconnaissables qui permettaient de corréler facilement les émissions laser avec le terrain étudié. La figure 19 montre comment les parties de transects ont été délimitées.

Nous avons effectué, sur le terrain, plusieurs mesures de la hauteur du couvert forestier à différents intervalles le long du transect. La photographie aérienne sur laquelle le transect était reproduit a servi à le localiser sur le terrain. Nous avons établi la moyenne des mesures de hauteur afin de calculer la hauteur du peuplement au dixième de mètre près.

La densité des couverts de cimes a été mesurée directement à partir de photographies aériennes. La proportion de la partie étudiée du transect comprenant des cimes vivantes a été mesurée et exprimée en pourcentage de la densité du couvert de cimes du peuplement en question (figure 23). Ces pourcentages ont été placés dans une des classes de densité suivantes:

Classe	Limites (%)	Centre (%)
A	0 - 20	10
B	21 - 40	30
C	41 - 60	50
D	61 - 80	70
E	81 - 100	90

Nous avons achevé la description du type de couvert forestier par photo-interprétation et par des vérifications sur le terrain pendant les mesures des hauteurs. Les types de couvert forestier étaient fonction de la proportion de résineux et de décidus dans les peuplements, selon les classes et les critères suivants:

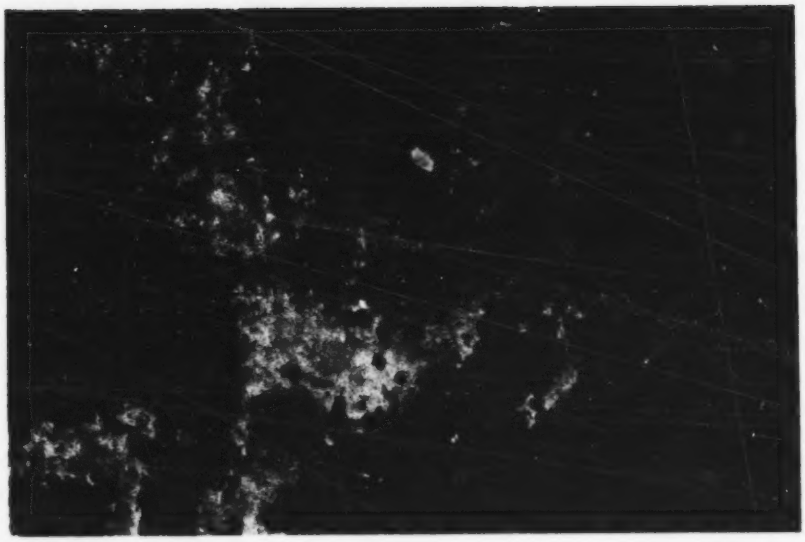


Figure 23. Illustration montrant la façon dont la densité du couvert de cimes est déterminée à partir d'une photographie aérienne. Ici, environ la moitié du segment de transect représenté se compose de cimes vivantes.

Classe	Critères
S	Majorité de résineux (le couvert est composé de résineux dans une proportion d'au moins 75 %)
M	Mélange de résineux et de décidus (le couvert est composé de résineux dans une proportion de 25 à 75 %)
H	Majorité de décidus (le couvert se compose de décidus dans une proportion d'au moins 75 %)

Nous avons prélevé beaucoup d'échantillons de peuplements le long du transect afin de représenter le plus grand nombre possible de conditions de hauteur, de densité et de couvert et de combinaisons de ces conditions selon différents réglages de la divergence du faisceau laser.

Les données laser ont ensuite été traitées au moyen d'algorithmes qui, d'après les résultats des tests de la phase 2, se sont révélés les plus efficaces pour l'estimation de la hauteur des peuplements, de la densité des couverts de cimes et du type de couvert forestier.

Analyse et résultats

Hauteur des peuplements

La hauteur des peuplements a été traitée comme une variable continue tandis que les estimations dérivées des données laser ainsi que des mesures sur le terrain et de la photo-interprétation ont été traitées comme des paires d'observation et soumises à une analyse de régression linéaire. Cette dernière a permis de déceler et de quantifier les effets systématiques, d'isoler les effets scalaires et, par l'analyse des erreurs résiduelles, d'évaluer la précision des mesures. En effet, le modèle de régression supprime les effets systématiques et scalaires en supposant leur constance et produit des estimations corrigées des hauteurs qui peuvent être comparées aux valeurs témoins. Les coefficients systématiques et scalaires dérivés pendant les travaux d'élaboration de la phase 2 ont été intégrés dans le modèle de mesure de la hauteur des peuplements vérifié à la phase 3.

L'algorithme de mesure de la hauteur des peuplements que l'on a vérifié faisait appel au discriminateur de hauteur sur le flanc avant des ondes au niveau de 85 %, décrit à la phase 2. L'estimation de la hauteur des peuplements était fondée sur la simple moyenne de toutes les mesures de hauteur le long du segment de transect choisi. Les échantillons de hauteur étaient déterminés à partir du premier et du dernier sommets de chaque écho à ondes multiples. Les données ont été stratifiées selon la divergence du faisceau laser, mais pas selon le type de couvert forestier. La figure 18 montre la relation entre les mesures de hauteur dérivées des données laser et celles effectuées sur le terrain. Le tableau 10 donne les erreurs systématiques résiduelles exprimées par la moyenne de la différence, et la variation exprimée par l'écart-type des différences, après ajustement pour une erreur systématique moyenne. Nous avons également calculé l'erreur-type pour tenir compte de l'effet combiné des erreurs systématiques et aléatoires résiduelles de mesure. L'utilisation de faisceaux plus larges a permis d'atteindre une précision un peu plus grande: à 20 mR, l'erreur-type diminuait jusqu'à 2,1 m. Les résultats obtenus équivalaient à une marge

d'erreur de ±4,1 m au niveau de 95 %, ce qui représente un degré de précision supérieur aux exigences minimales.

Densité des couverts de cimes

La densité des couverts de cimes a été estimée à l'aide des variables et du modèle décrits et vérifiés à la phase 2. Le modèle faisait appel à des variables dérivées d'une série d'échos renvoyés par un peuplement relativement homogène: proportion des échos à onde unique dans le nombre total d'échos renvoyés par le peuplement étudié, amplitude maximale moyenne des échos renvoyés par le couvert forestier et par le sol, rapport d'amplitude moyen des échos renvoyés par le couvert forestier et par le sol, et superficie moyenne mesurée dans la partie des échos correspondant au couvert forestier. Le modèle ayant donné les meilleurs résultats à la phase 2 a servi à la vérification des données, soit celles touchant 61 peuplements dont la densité du couvert de cimes variait entre 10 et 100 %. Les valeurs de la densité des couverts de cimes dérivées des mesures laser ont été comparées à celles obtenues par photogrammétrie; pour ce faire, nous avons employé la méthode décrite à la phase 2 avec une matrice de corrélation comportant des classes de 20 % (tableau 11). Les deux méthodes de stratification des valeurs de la densité des couverts de cimes dans des classes de 20 % concordaient dans 62 % des cas (autrement dit, dans ces cas, les valeurs se trouvaient sur la même diagonale représentée par un trait plein). Bien que ce résultat soit inférieur aux exigences minimales, le classement des valeurs de densité des couverts de cimes dérivées des mesures effectuées par laser à faisceau impulsionnel est tout de même considéré comme valable. Quatre-vingt-neuf pour cent des peuplements étudiés ont été placés correctement dans une classe de densité sur la diagonale. Étant donné que le choix des peuplements était aléatoire, les cinq classes de densité n'étaient pas représentées également. Les peuplements ayant une densité de couvert de cimes de 80 à 100 % étaient beaucoup plus nombreux que ceux des classes de densité inférieure. Ainsi, par un heureux hasard, beaucoup plus de peuplements appartenant à la classe de forte densité ont pu être étudiés.

Type de couvert forestier

Les classes de type de couvert forestier ont été établies à partir de variables laser fondées principalement sur le nombre de sommets dans un écho. Le modèle considéré comme le plus efficace (voir la phase 2) a servi à classer 120 peuplements; ceux-ci ont également été classés par photo-interprétation et par des contrôles sur le terrain. Trois classes ont été établies d'après la proportion du couvert de cimes composée de résineux: décidus (moins de 25 % de résineux), peuplements mixtes (25 à 75 % de résineux) et résineux (plus de 75 % de résineux).

Le tableau 12 donne les résultats du classement selon le type de couvert forestier. Les valeurs dérivées des mesures laser correspondent dans seulement 38 % des cas à celles résultant dû au hasard (33 %). Ce résultat ayant été bien inférieur aux exigences minimales, nous avons considéré cette application du laser à faisceau impulsionnel comme un échec. Toutefois, le test touchait des données recueillies à une période où les décidus portaient encore des feuilles. Nous aurions obtenu de meilleurs résultats en l'absence de feuilles mais, évidemment, la photographie aérienne permet d'obtenir des

Tableau 10. Précision des modèles d'estimation de la densité des couverts de cimes à partir des mesures effectuées par laser à faisceau impulsionnel

Divergence	Variables utilisées	R^2	Erreur-type de régression (%)
1 mR	Ondes manquantes, sommet 2, superficie du couvert, superficie totale, hauteur	0,80	14,9
2	Ondes manquantes, sommet 1, sommet 2, nombre de sommets, superficie totale	0,66	18,1
5	Ondes manquantes, sommet 1, sommet 2, rapport d'amplitude, hauteur	0,90	7,5
10	Ondes manquantes, sommet 1, rapport d'amplitude maximal, hauteur	0,89	9,5
20	Ondes manquantes, sommet 1, sommet 2, rapport d'amplitude, superficie du couvert	0,84	13,9

Tableau 11. Statistiques sur la précision des mesures de la hauteur des peuplements dérivées des données obtenues par laser à faisceau impulsionnel

Divergence du faisceau (mR)	1	2	5	10	20
Différences moyennes	-2,1	-1,8	-1,6	-0,1	1,1
Écart-type de la différence	2,3	3,2	2,6	2,4	1,8
Erreur-type	3,1	3,7	3,1	2,4	2,1
Nombre d'observations	24	25	24	24	23

Tableau 12. Matrice de corrélation des mesures de la densité des couverts de cimes dérivées de données laser et de photographies aériennes

	Densité des couverts de cimes dérivée de données laser					
	10	30	50	70	90	Total
10			1	2		3
30	2	2	2	2	1	9
50			4	1		5
70			1	6	2	9
90			1	8	26	35

Tableau 13. Matrice de corrélation montrant la concordance entre la détermination du type de couvert forestier dérivée de données laser et celle dérivée de photographies aériennes et de travaux sur le terrain

	Détermination du type de couvert forestier dérivée de données laser			
	Décidus	Peuplements mixtes	Résineux	Total
Décidus	8	35	12	55
Peuplements mixtes	5	32	8	45
Résineux	3	11	6	20

renseignements de ce genre avec un minimum d'efforts, ce qui n'est pas le cas lorsque les décidus ont leurs feuilles.

Conclusions - Phase 3

La phase 3 des travaux visait à évaluer avec quelle précision les lasers à faisceau impulsionnel permettent d'estimer la hauteur et la densité des peuplements forestiers et le type de couvert forestier. En vue d'orienter les tests, nous avons établi des normes minimales avant leur exécution.

Les tests ont révélé que la hauteur des peuplements peut être dérivée de données laser avec un degré de précision dépassant la norme. De plus, la composition et la densité des peuplements n'avaient pas une grande influence sur la précision des mesures. Les recherches de la phase 2 ont également révélé que la divergence du faisceau laser a peu d'influence sur la précision des mesures - les meilleurs résultats sont obtenus lorsque le faisceau est réglé à 10 mR. Lorsque la divergence du faisceau est grande, les valeurs sont lissées en intégrant ou bien en établissant une <<moyenne>> sur une grande partie du peuplement étudié. Toutefois, cette caractéristique n'était pas considérée comme utile pour l'établissement de profils des peuplements et des terrains sous-jacents car, dans ce cas, il est plus important d'obtenir des points cotés.

La densité des couverts de cimes peut être mesurée à partir de données laser, mais avec un degré de précision inférieur à la norme minimale. Toutefois, l'évaluation était fondée sur la concordance entre les valeurs dérivées des données laser et celles dérivées de la photo-interprétation. Même si ces dernières étaient les meilleures que nous ayons pu trouver pour établir une norme, la disparité des valeurs pourrait être attribuée en partie aux variations minimes dans l'emploi de la méthode.

Le classement des types de couvert forestier par laser n'a pas donné de résultats satisfaisants. En fait, des nombres aléatoires auraient été presque aussi valables.

Phase 4

CONCLUSIONS, APPLICATIONS ET AVANTAGES

Résumé

1. Le laser à faisceau impulsionnel a permis de mesurer la hauteur de peuplements forestiers avec précision, soit avec une marge d'erreur de ±4,1 m à un niveau de confiance de 95 %. Les méthodes d'extraction des données sur la hauteur étaient fondées sur le traitement des formes d'ondes d'échos laser individuels à plusieurs ondes. Une série d'échos de ce type a servi à l'estimation de la hauteur des peuplements.

2. La technologie et les algorithmes utilisés pour le traitement d'échos à plusieurs ondes ont également permis de mesurer avec précision la densité des couverts de cimes. Celle-ci a été répartie correctement par laser en plusieurs classes de 20 % dans 62 % des cas et en une seule classe de 20 % dans 89 % des cas.

3. Les lasers à faisceau impulsionnel ne fournissaient pas beaucoup de renseignements sur le type de couvert forestier (classes de décidus, de résineux et de peuplements mixtes) ni d'autres renseignements sur les essences forestières.

4. Selon les résultats des tests, le fait que le faisceau impulsionnel peut traverser le couvert forestier et fournir un profil double du couvert et du sol sous-jacent laisse poindre un avenir prometteur pour l'établissement de profils de sols. Toutefois, cette application débordait le cadre de nos travaux car nous n'avons pas eu à établir avec précision la distance verticale entre l'aéronef et le sol pendant les vols.

5. Le degré de divergence du faisceau laser n'a pas eu une grande influence sur la mesure de la hauteur des peuplements. Toutefois, l'utilisation d'un faisceau plus étroit permettait d'établir un meilleur profil des peuplements (et probablement des terrains) à cause de la nécessité d'établir des points cotés précis. En revanche, le classement des peuplements selon la densité était plus précis lorsque le faisceau était plus large, en particulier de 5 à 10 mR.

6. La présence ou l'absence de feuilles dans les peuplements de décidus n'a pas eu un effet important sur l'estimation de la hauteur ou de la densité des peuplements à partir des formes d'ondes.

7. L'utilisation de facteurs de différenciation des hauteurs entre les flancs avant de deux ondes a donné des résultats optimaux au niveau de 85 % de la hauteur maximale des ondes. Cependant, les facteurs de différenciation de hauteur entre les sommets des ondes et les niveaux de 20 % de la hauteur des ondes donnaient à peu près les mêmes résultats.

8. Nos travaux visaient l'analyse d'échos individuels produits par un laser beaucoup plus petit disponible sur le marché. Des problèmes techniques et l'impossibilité d'utiliser jusqu'à la fin des travaux l'aéronef du CCT et le système aéroporté d'acquisition de données, qui était essentiel, nous ont empêchés de poursuivre les recherches dans cette voie.

9. Le système aéroporté d'acquisition de données (composé d'un numériseur multifonctions et de magnétophones grande puissance pour le codage des émissions laser) utilisé pour l'échantillonnage des données sur la forme des ondes réfléchies était essentiel pour la production de données sur les peuplements forestiers. Cet équipement est très sophistiqué, complexe et coûteux. La possibilité de remplacer ce système et ses composantes servant à l'analyse des données sur les formes d'ondes par une <<boîte noire>> commandée par microprocesseur et conçue pour produire des données sur la distance et sur la hauteur et la densité des peuplements est extrêmement intéressante. Les résultats de nos travaux fournissent la plupart des données techniques permettant de concevoir et de fabriquer une <<boîte noire>>.

10. Dans certains cas, les données laser sur la distance quasi verticale entre l'aéronef et le couvert forestier, et le terrain sous-jacent, peuvent servir au lieu des données sur les formes d'ondes pour déterminer la hauteur et la densité des peuplements forestiers. Toutefois, dans le cas des peuplements (surtout de décidus) denses, le faisceau laser ne peut traverser le couvert forestier assez souvent pour fournir des données fiables. À cet égard, le laser à impulsions rapides disponible sur le marché était plus efficace que le bathymètre à laser, mais il n'était pas assez fiable dans les secteurs où le couvert forestier était dense et le relief accidenté.

11. La méthode de rétablissement de la trajectoire faisant appel à une caméra vidéo couplée avec une caméra de photographie aérienne, avec enregistrement de l'heure sur les prises de vues des deux appareils, a donné des résultats appropriés pour la foresterie. Elle peut servir de méthode de remplacement ou de secours avec d'autres systèmes de navigation, comme le système de positionnement par hyperfréquences ou de navigation inertielle. Ce dernier, coûteux, exige un matériel plus abondant et beaucoup d'opérations de traitement et d'analyse des données.

Applications et avantages

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les lasers à faisceau impulsionnel permettent de mesurer avec précision la hauteur et la densité des peuplements forestiers. En fait, les résultats obtenus étaient comparables ou très supérieurs à ceux qu'on peut obtenir de l'interprétation de photographies aériennes de couverture générale. Par contre, le laser disponible sur le marché n'était pas aussi fiable pour déterminer la composition des peuplements ou le type de couvert forestier. Le faisceau impulsionnel traversait le couvert forestier, permettant ainsi de mesurer la distance entre celui-ci (et, souvent, le terrain sous-jacent) et l'aéronef. Les figures 20 et 21 montrent le potentiel du système pour l'établissement du profil de peuplements forestiers. Le faisceau a traversé les peuplements de décidus dans environ 83 % des cas et les peuplements de résineux dans plus de 90 % des cas. Un faisceau à impulsions plus rapides donnerait des profils plus précis du sol. Toutefois, nous n'avons pas étudié cette application comme telle. Néanmoins, l'établissement de profils du sol devrait être techniquement possible avec une marge d'erreur maximale de ±3 m, au moins dans un proche avenir, à la condition d'utiliser un dispositif fiable de mesures de la distance verticale entre l'aéronef et le sol, tels un système de navigation inertielle ou de positionnement par hyperfréquences, des capteurs barométriques ou des satellites de navigation.

Étant donné que les lasers à faisceau impulsionnel donnent d'aussi bons résultats que la photo-interprétation traditionnelle pour la mesure de la hauteur et de la densité des peuplements forestiers, nous pourrions conclure que la comparaison entre les deux méthodes se réduit à une question de coût. Toutefois, ce n'est probablement pas le cas dans la pratique puisque la photo-interprétation nécessite la délimitation et le classement de zones homogènes alors que les systèmes laser, dans la configuration que nous avons étudiée, ne permettent l'échantillonnage que le long de transects. L'extension de cas transects ou l'extrapolation des résultats est une tâche ardue; c'est pourquoi il faudrait au moins établir des transects transversaux - même dans ce cas, une grande partie de la région étudiée resterait oubliée. Donc, pour le classement des peuplements forestiers, on ne pourra probablement augmenter l'efficacité du laser à faisceau impulsionnel qu'en l'utilisant de concert avec des méthodes d'interprétation traditionnelles. Les données laser pourraient fournir, confirmer ou vérifier des estimations quantitatives de la hauteur et de la densité de peuplements dans des zones délimitées sur des photographies aériennes.

La nouvelle technologie pourrait améliorer la fiabilité des résultats et réduire la durée et le coût du travail de classement des peuplements par l'interprète des photographies aériennes. Plus précisément, comme le laser permet une couverture plus complète que les contrôles sur le terrain, la somme de travail nécessaire à la photo-interprétation pourrait être réduite considérablement et la qualité du travail pourrait être améliorée. Le coût d'intégration de la technologie laser comprendrait la mise en place d'installations aéroportées et de traitement des données, qui représente surtout un coût fixe, ainsi que l'exécution d'une campagne de mesures aériennes et le traitement des résultats, dont le coût est lié en grande partie à la longueur en kilomètres du transect. Étant donné que le coût fixe est assez élevé au départ, le coût par kilomètre parcouru diminue rapidement à mesure que les distances augmentent. Par conséquent, l'application de cette technologie n'est économique que pour les travaux importants. Par ailleurs, si un service d'établissement de profils par laser était offert à plusieurs clients, la technologie se rétabliserait plus rapidement en raison des économies d'échelle réalisées.

Si des efforts supplémentaires étaient déployés, le laser à faisceau impulsionnel pourrait être mis à profit dans d'autres secteurs d'activité. Nos travaux montrent qu'il serait possible de l'utiliser pour établir des profils dans les travaux d'établissement de cartes topographiques, pour classer les terrains et effectuer des études techniques et sur l'irrigation et le drainage, pour le choix d'emplacements de routes et de corridors et pour étudier la traficabilité de terrains. En foresterie, des variables comme le volume et la biomasse, qui sont reliées à la hauteur et à la densité des peuplements, pourraient être calculées aussi efficacement et peut-être aussi précisément au moyen d'un système laser que par les méthodes traditionnelles.

Nos travaux étaient limités à des peuplements mixtes, de résineux, et de décidus de l'est du Canada. Les résultats peuvent probablement s'appliquer aussi à la forêt boréale, qui couvre une grande partie du territoire canadien. Toutefois, nous n'avons pas traité la forêt ombrophile de la côte ouest où les peuplements sont plus hauts, plus denses et parfois pluriétagés. La forêt tropicale semble être un milieu propice à l'établissement de profils par laser: elle est non seulement éloignée des régions habitées et difficile à

atteindre par voie terrestre, mais il est également très ardu de classer par les méthodes traditionnelles les peuplements qui la composent. La hauteur de ces peuplements est presque impossible à estimer, ceux-ci étant très denses et pluriétagés. Évidemment, ces mêmes conditions constituent un obstacle considérable à la pénétration des ondes radar, et il pourrait en être de même pour le faisceau impulsionnel du système laser. En outre, pour pouvoir étudier les forêts tropicales à partir d'échos laser à plusieurs ondes, il faudra faire des vérifications et probablement réviser en partie les algorithmes de réduction des données.

Recommandations

Selon nous, les activités suivantes seraient un complément approprié à nos travaux:

1. L'analyse des données laser devrait être étendue à d'autres variables relatives aux peuplements forestiers, comme le volume et la biomasse.

2. L'établissement de profils des terrains devrait se poursuivre. Les efforts devraient porter sur le relevé de la position verticale de l'aéronef, paramètre essentiel, plutôt que sur le système laser. Il faudrait déterminer le potentiel de plusieurs systèmes de navigation, comme les systèmes de navigation inertielle et de positionnement par hyperfréquences et par satellite, de capteurs barométriques et d'accéléromètres verticaux, ou une combinaison de ces systèmes.

3. L'utilisation du laser à faisceau impulsionnel pour la production de données sur les peuplements forestiers devrait être étendue à d'autres types de forêts. La forêt ombrophile tropicale est particulièrement intéressante à cet égard. Des essais devraient donc être effectués en milieu tropical.

4. Il faudrait concevoir un système commercial qui pourrait être intégré dans une ou deux unités compactes. Facile à utiliser, celui-ci fournirait directement des données sur les peuplements forestiers et les profils par l'intermédiaire d'un microprocesseur autonome. La plupart des paramètres de ce système ayant trait au traitement des données sont déjà établis.

REMERCIEMENTS

Nous remercions sincèrement la Direction de la statistique et des systèmes forestiers (DSSF), de l'Institut forestier national de Petawawa (IFNP), qui a financé les travaux. Le Centre canadien de télédétection (CCT) nous a apporté une aide technique considérable et essentielle, et le Service canadien des forêts a aimablement fourni l'équipement photogrammétrique qui nous a permis de recueillir les données sur les peuplements forestiers pour l'évaluation du système lidar.

Nous sommes reconnaissants à MM. B.D. Haddon (DSSF) et J. Gibson (CCT) et au Dr D.G. Leckie (IFNP) qui ont participé aux travaux du Comité directeur technique présidé par M. Bonnor. Le Dr R.A. O'Neil, du CCT, nous a fourni sans compter une aide inestimable en ce qui concerne le système de traitement des données lidar.

RÉFÉRENCES

Aldred, A.H.; Lowe. J.J. 1978. Application of large-scale photos to a forest inventory in Alberta. Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-107. 57 p.

Aldred, A.H.; Sayn-Wittgenstein, L. 1968a. Development and field tests of the forestry radar altimeter. Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-14. 34 p.

Aldred, A.H.; Sayn-Wittgenstein, L. 1968b. Tropical tests of the forestry radar altimeter. Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-12. 28 p.

Arp, H.; Griesback, J.C.; Burns, J.P. 1982. Mapping in tropical forests: a new approach using the laser APR. Photogram. Eng. 48(1): 91-100.

Collins, J.G. 1979. Airborne laser valley/stream cross-section data collection. Pages 63-70 in Proc. Rem. Sens. Symp., Oct. 29-31, 1979, Reston, Va.

Collins, J.G. 1980. Airborne laser acquisition of cross section data. Pages 175-181 in Proc. of Specialty Conf. of the Aerospace Div. ASCS, Aug. 13-14, 1980, Madison, Wis.

Enabnit, D. 1979. Airborne laser hydrography. Pages 71-72 in Proc. Rem. Sens. Symp., Oct. 29-31, Reston, Va.

Fabian, W.; Sizgoric, S.; Thillaye, B.M. 1979. A high resolution laser terrain profiler. Optek Inc., Downsview, Ont.

Forest Mgmt. Inst. 1978. Program Review 1976-78. Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. 47 p.

Gibson, J.R.; Dow, A.J.; Masry, S.E. 1981. Adjustment of position using inertial navigation systems. Photogram. Eng. 47(2): 185-192.

Hibler, W.D. 1975. Characterization of cold regions terrain using airborne laser profilometry. J. Glaciol. 15(73): 329-347.

Hodg, F.E.; Swift, R.N.; Frederick, R.N. 1980. Water depth measurement using an airborne pulsed neon laser system. Appl. Optics 19(6): 871-883.

Jensen, H. 1967. Performance of an airborne laser profiler. Proc. Airborne Photo-optical Instrumentation Symp., Feb. 20-21, 1967. Cocoa Beach, Fl.

Jensen, H.; Ruddock, K.A. 1965. Applications of a laser profiler to photogrammetric problems. Paper presented to ASP, Washington, D.C.

Kirby, M.E.; Sutton, J.T. 1981. Comparisons of laser profilometer sea ice roughness with surface-truthed data and SLAR imagery. Pages 563-575 in Proc. 15th Intl. Symp. on Rem. Sens. of Env., Ann Arbor, Mi.

Korbick, M.; Elacki, C. 1981. A shuttle scanning laser altimeter for topographic mapping. Pages 711-714 in Proc. 15th Intl. Symp. on Rem. Sens. of Env., Ann Arbor, Mi.

Krabill, W.B.; Collins, J.G.; Link, L.E.; Swift, R.N.; Butler, M.L. 1984. Airborne laser topographic mapping results. Photogram. Eng. 50(6): 685-694.

Link, L.E. 1969. Capability of airborne laser profilometer to measure terrain roughness. Pages 189-196 in Proc. 6th Symp. on Rem. Sens. of Env., U. of Michigan.

Link, L.E. 1973. Analysis of the ability of a laser profilometer system to evaluate unprepared landing sites. U.S. Army Eng. Waterways Expt. Misc. Paper M-73-7. 51 p.

Link, L.E.; Collins, J.G. 1981. Airborne laser mapping systems for corps hydrogeometric surveys. Pages 74-89 in Proc. U.S. Army Corps of Engineers Conf., Nashville, Tenn.

Lowry, R.T.; Brochu, C.J. 1975. A system for the treatment of airborne laser profilometer data of ice. Defence Research Establishment, Ottawa. Rep. No. 725. 53 p.

Lyons, E.H. 1967. Forest sampling with 70 mm fixed air-base photography from helicopters. Photogrammetrica 22: 213-231.

Mamon, G.; Wheeler, R.L.; Youmans, D.G. 1976. Laser ranging and tracking systems analyses and experiments for aerial profiling of terrain. Contract Rep. R-968, The Charles Stark Draper Lab, Inc., Cambridge, Ma.

Mamon, G.; Youmans, G.; Sztankay, Z.G.; Morgan, C.E. 1978. Appl. Optics 17(6): 868-877.

Nielsen, U. 1970. Forestry radar altimeter tests. Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Internal Rep. FMR-17. 17 p.

Nielsen, U. 1971. Tree and stand measurements from aerial photographs: an annotated bibliography. Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-29. 111 p.

Nielsen, U. 1974a. Description and performance of the forestry radar altimeter. Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-59. 17 p.

Nielsen, U. 1974b. The forestry radar altimeter tested in the tropics. Can. For. Serv., For. Mgmt. Inst. Inf. Rep. FMR-X-66. 13 p.

Nielsen, U.; Aldred, A.H. 1978. New developments for tropical surveys prove successful. Can. For. Serv., For. Mgt. Inst. Reprint of paper presented at IUFRO/ISP Meeting, July 2-8, 1978, Freiburg, Germany. 12 p.

Nelson, R.; Krabill, W.B.; MacLean, G. 1983. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. Unpubl. report. NASA/Goddard Space Flight Centre, Greenbelt, Md.

O'Neil, R.A. 1980. Field trials of a lidar bathymeter in Magdalen Islands. Paper presented to Laser Hydrography Symp., Defence Research Centre, Adelaide, S. Australia.

Rempel, R.C.; Parker, A.K. 1964. An information note on an airborne laser terrain profiler for micro-relief studies. Pages 321-337 in Proc. 3rd Symp. on Rem. Sens. of Env., U. of Michigan Inst. of Science and Technology.

Tooma, S.G.; Tucker, W.B. 1973. Statistical comparison of airborne laser and stereo photogrammetric sea ice profiles. Rem. Sens. of Env. 2(4): 261-272.